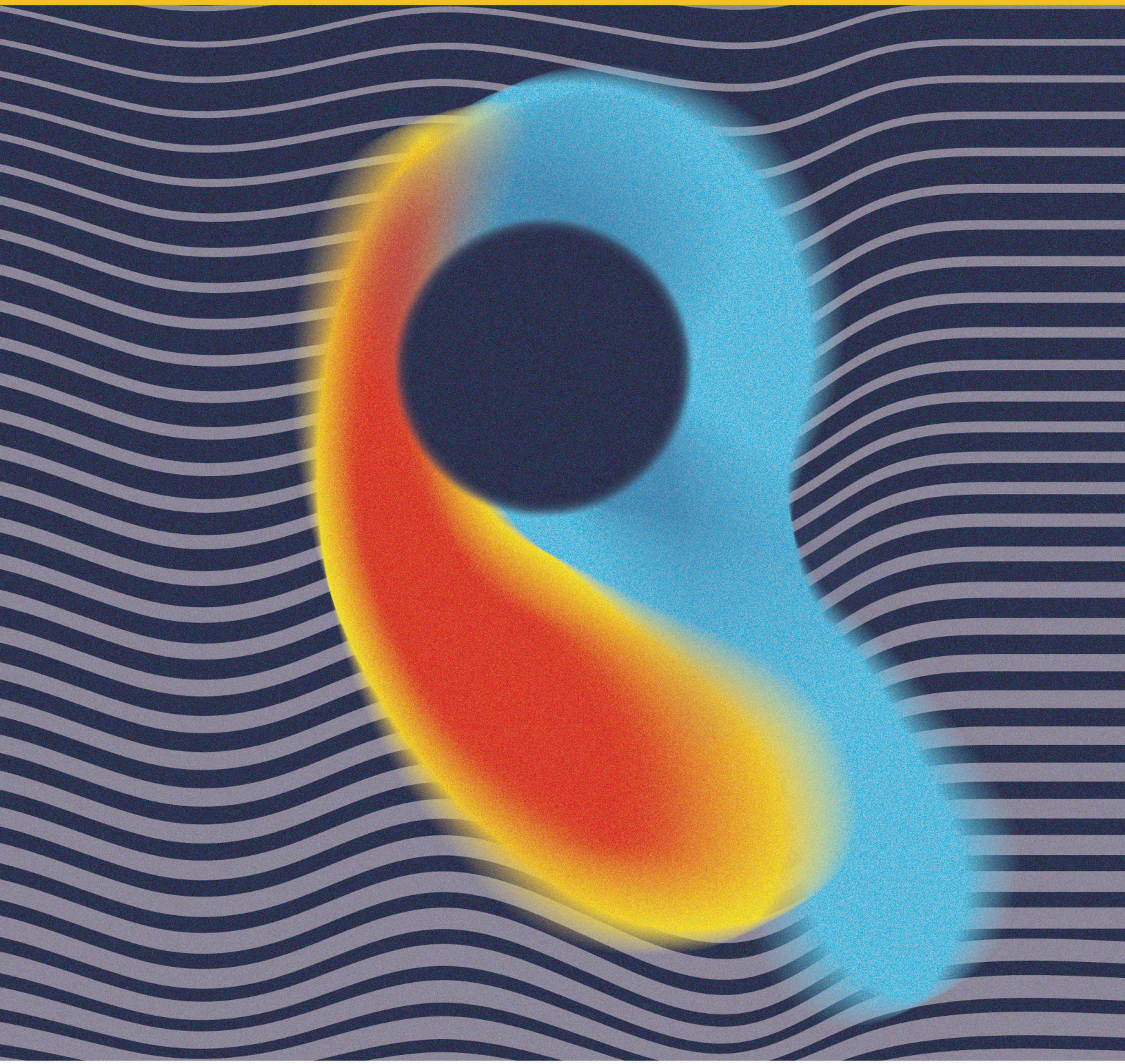
TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Enero - Junio 2024 Vol. 7 / Núm. 1 ISSN: 2992-8338



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Volumen 7, Núm. 1, Enero-Junio 2024

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

VOLUMEN 7, NÚM. 1 ENERO-JUNIO 2024 **ISSN: 2992-8338**

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

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA, Volumen 7. Núm.1 enero-junio 2024, 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, 17 de junio 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 retomada y tratada de la Figura 2- a) Desprendimiento de Vórtices en estructura circular adaptada de (Williamson and Govardhan 2004) y b) Estructura cilíndrica y desprendimiento de vórtices tomada de (Facchinetti et al., 2004) del artículo *Bladeless Hydro Generators Sustainable Electric Power* del área de Ingeniería Mecánica, del eje estratégico Soberanía Energética.

Editorial

El Volumen 7, Número 1 (Enero-Junio 2024) de la revista semestral Tecnología y Ciencia Aplicada, editada por el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET), presenta 44 artículos que abordan 6 Ejes Estratégicos fundamentales: Desarrollo Urbano-Industrial, Economía Social y Solidaria, Sistemas Socioambientales y Sustentabilidad, Soberanía Alimentaria, Soberanía en Salud, y Soberanía Estratégica. Estos ejes se relacionan con áreas de experiencia del CENIDET como Ciencias de la Computación, Ingeniería Electrónica y Mecánica.

Cada artículo fue presentado en el Segundo Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA-CENIDET), tanto de manera virtual como presencial, y validado por revisores internos y externos que respaldan la innovación y el sustento científico-tecnológico de los trabajos.

La revista Tecnología y Ciencia Aplicada del CENIDET no solo promueve la publicación de investigaciones desde el nivel de licenciatura, sino que también fomenta el desarrollo de habilidades investigativas desde etapas tempranas de la formación académica. Además de contar con ISSN, permite a los autores compartir sus descubrimientos con la comunidad académica global, aumentando su visibilidad y estableciendo una base sólida para futuras oportunidades en sus respectivos campos.

El proceso de preparación y revisión de los artículos en la revista no solo fortalece habilidades como la investigación rigurosa y la redacción académica, sino que también facilita la colaboración entre estudiantes y académicos a nivel internacional, promoviendo proyectos multidisciplinarios que enriquecen el panorama académico y científico.

Con esta iniciativa, el CENIDET consolida su posición como líder en la investigación académica al contribuir activamente al avance del conocimiento, a la formación de investigadores y a la contibución en políticas públicas y prácticas profesionales a nivel global.

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
Mtro. Alejandro Castañeda Pacheco
Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dra. Andrea Magadan Salazar
Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles
Dr. Carlos Astorga Zaragoza
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dra. Claudia Cortés García
Dr. Daniel Rojas Plata
Mtra. Daniela Hernández Castañeda
Dr. Dante Mújica Vargas
Dr. Emmanuel Olmos Barba
Dr. Erik Rosado Tamariz
Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Dr. Hugo Estrada Esquivel
Dr. Hugo Calleja Gjumlich
Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
Dr. Jarniel García Morales
Dr. Javier Ortiz Hernández
Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Dr. Jesús Arce Landa
Dr. Jesús Dario Mina Antonio

Comité de arbitraje Externo

Dra. Adriana Mexicano Santoyo
TecNM/ Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria

Dr. Carlos Manuel Lara Barrios
LABELPAC Inc. Canadá

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

Dr. Enrique Alcudia Zacarías
Universidad Autónoma de Baja California

Dr. Enrique de Jesús Moreno Carpintero
TecNM/ / Instituto Tecnológico de Zacatepec

Dr. Héctor Ramón Azcaray Rivera
TecNM/ / Instituto Tecnológico de Oaxaca

COMITÉ DE ARBITRAJE INTERNO Y EXTERNO

Comité de arbitraje TecNM / Cenidet

Dr. Joaquín Pérez Ortega
Dr. Jonathan Villanueva Tavitas
Dr. Jorge Colín Ocampo
Dr. José Jassón Flores Prieto
Dr. Juan Reyes Reyes
Dr. Juan Carlos Rojas Pérez
Dr. Juan Gabriel González Serna
Dr. Manuel Adam Medina
Dra. Marisol Cervantes Bobadilla
Dr. Máximo López Sánchez
Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda
Dra. Mónica Borunda Pacheco
Dr. Nimrod González Franco
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dra. Olivia Graciela Fragoso Díaz
Dr. Raúl Pinto Elías
Dr. René Santaolaya Salgado
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Dr. Rodolfo Amalio Vargas Méndez
Mtra. Rosa Olivia Maquinay Diaz
Mtra. Samanta López Salazar
Mtra. Silvia Patricia Pérez Sabino
Dr. Vicente Borja Jaimes
Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
Mtro. Víctor Iván Rodríguez Reyes
Mtro. Víctor Josué Ruiz Martínez
Dr. Vitervo López Caballero

Comité de arbitraje Externo

Dra. Hilda Castillo Zacatelco
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dra. Mireya Tovar Vidal
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dr. Omar Arturo Domínguez Ramírez
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Dr. Pedro Cruz Alcántar
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Dr. Quirino Estrada Barbosa
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

TECNOLOGÍA Y CIENCIA APLICADA

Consejo Editorial de la Publicación y Ciencia Aplicada

Dr. Arturo Ernesto Mares Gardea
Coeditor
Director del TecNM/Cenidet

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Coeditor
Subdirector Académico

M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Editora
Jefa de Vinculación y Gestión Tecnológica

Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Editor asociado

Mtro. Víctor Josué Ruiz Martínez
Sitio Web

María Guadalupe Soriano Alvear
Diseño de portada

María Guadalupe Soriano Alvear
Leslie Adamary Aguilar Villamar
M.C. Silvia Patricia Pérez Sabino
Diseño Editorial

Segundo Congreso de Tecnología y Ciencia Aplicada (CITCA) 2024 22-24 de mayo del 2024

Dr. Arturo Abúndez Pliego
Coordinador general del (CITCA) mayo 2024

Comité Organizador (CITCA) mayo del 2024

Dra. Alicia Martínez Rebollar
Dr. Andrés Blanco Ortega
Dr. Arturo Abúndez Pliego
Dr. Arturo Ernesto Mares Gardea
Dr. Carlos Daniel García Beltrán
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Dr. Jarniel García Morales
Dr. Juan Carlos Rojas Pérez
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez
Dr. Rafael Campos Amezcua
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Dra. Yasmín Hernández Pérez
Mtra. Patricia Pérez Sabino
Mtro. Víctor Josué Ruiz Martínez

DESARROLLO URBANO – INDUSTRAL

- Explorando el Futuro Educativo - Revisión Sistemática de la Literatura de Asistentes Educativos Holográficos y Conversacionales 12
- Cifrado de audio basado en sistemas caóticos: Un enfoque para la seguridad en comunicaciones 20
- *Application of Last Planner System: a case study* 26
- La productividad de los proyectos tecnológicos y gestión de su valor como intangibles tecnológicos y de propiedad intelectual 31
- Análisis numérico de la capacidad de absorción de energía de perfiles multicelulares cuadrados bajo cargas axiales 37
- Visualización de grandes volúmenes de datos con QGIS para la toma de decisiones 42
- *The exercise of sovereignty with the use of Distributed Ledger Technologies* 48
- Ponderación de variables causales de congestión de tráfico utilizando el método de entropía 52
- Revisión de la literatura: gobierno de datos en las organizaciones 58
- *A general view of attacks in the age of cyber-technologies* 64
- Avances recientes en el control por modos deslizantes para la recuperación sismo-resistente de estructuras con sistemas de aislamiento pasivo 70
- Una Propuesta para Defininr la Granularidad de los Servicios Web de Aprendizaje 77
- Herramienta de Reestructuración para Diagramas de Clase UML Usados como Recurso de Aprendizaje 82

ECONOMÍA SOCIAL Y SOLIDARIA

- Revisión de la literatura: Módulo Experto en los Sistemas Tutores Inteligentes 88
- Modelo de calidad para determinar la granularidad de microservicios 94

SISTEMAS SOCIOAMBIENTALES Y SUSTENTABILIDAD

- *Agrivoltaic parks: An alternative for energy sustainability in the state of Morelos* 102
- Revisión de la literatura sobre aprendizaje automático aplicado a la predicción del rendimiento en la siembra de cultivos 108
- Revisión de convertidores CD-CD de tres puertos aislados para sistemas fotovoltaicos con almacenamiento integrado 114
- *Impact of Eco-Insulating Cover on Thermal Behavior: Study in an Experimental Module for Cwa Climate from Köppen Climate Classification* 120
- *Dividing Wall Column for debottlenecking presented by conventional distillation columns* 126
- Revisión Sistemática de la literatura: medición de pobreza a través de Redes Neuronales Convolucionales e Imágenes Satelitales 132
- *Energy consumption of the thermal system of a pilot-scale photobioreactor based on the variation of the controller hysteresis.* 138

SOBERANÍA ALIMENTARIA

- *Review of Dehydration Techniques and Equipment for Fruits and Vegetables* 145

SOBERANÍA ALIMENTARIA

- Evaluación de las condiciones ambientales para diseñar una cámara de fructificación de Pleurotus ostreatus. 150
- Red de sensores inalámbricos de largo alcance para monitoreo de variables agrícolas en zonas sin acceso a internet 156

SOBERANÍA DE SALUD

- *Review on Serious Games for Ankle Rehabilitation* 162
- Diseño y construcción de una órtesis de rodilla para el tratamiento de osteoartritis grado 1, buscando reducir su avance 168
- Creación de un Dataset para la Lengua de Señas Mexicana Usando el Framework Holistic de MediaPipe 174
- Aplicación de Ciencia de Datos para el Análisis Temporal de los Datos de Mortalidad por COVID-19 en México 180
- Revisión de las Características Fundamentales del Proceso de Electrohilado y sus Aplicaciones en el Ámbito Biomédico 185
- *AI for Involuntary Movements Characterization: Preliminary Results* 191
- Caracterización de la rigidez del tobillo: revisión del estado del arte 197
- Evaluación Comparativa de Máquina de Soporte Vectorial y K-Vecinos para Optimizar la Detección Facial de Emociones 203
- *Evaluation of the correlation models used in bone remodeling* 210
- Alternativas electromecánicas para el control del temblor causado por la enfermedad del Parkinson y Temblor Esencial 217

SOBERANÍA ENERGÉTICA

- Generación de energía eléctrica mediante corrientes marinas 224
- *Improving Energy Usage through Intelligent Load Management with the Help of the Grey Wolf Algorithm* 230
- *Application of an electronic differential for the rotation control of an electric wheelchair* 236
- Evaluación de la entropía de software generada por Código Dispensable en JAVA 241
- Desacoplamiento activo en sistemas conectados a red: arquitectura unipolar de Capacitores Conmutados Apilados 248
- Aerogeneradores sin aspas, una alternativa de generación de energía limpia. 254
- Hidro generadores sin aspas. Energía eléctrica sustentable 260
- *A Contemporary Brief Review of Low Power Turbines* 267
- Estudio experimental de la recuperación del déficit de velocidad aguas abajo de un aerogenerador 273
- Diseño y manufactura de túnel de viento subsónico de circuito abierto para pruebas de perfiles aerodinámicos. 277



DESARROLLO URBANO-INDUSTRIAL

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Explorando el Futuro Educativo - Revisión Sistemática de la Literatura de Asistentes Educativos Holográficos y Conversacionales

Ing. Orvil Alexis Villarreal Molina*. Dr. Nimrod Gonzalez Franco. Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez*****

Departamento de Ciencias de la Computación, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos México, (e-mail's: m23ce090@cenidet.tecnm.mx; nimrod.gf@cenidet.tecnm.mx**; noe.cs@cenidet.tecnm.mx***)*

Abstract: This paper provides a comprehensive review of the current landscape of Holographic Educational Assistants (HEA's) and Conversational Assistants (CA's), highlighting their impact on education. 50 relevant publications were reviewed and 24 were selected for detailed review. Diverse areas of research were explored, from the development of specific applications to advances in artificial intelligence applied to education. The importance of extending research on HAE's to different educational levels to maximize their impact on learning is highlighted.

Keywords: Holographic Educational Assistants, Conversational Assistants, Artificial Intelligence, Literature Review, Educational Technology.

1. INTRODUCCIÓN

Los Asistentes Educativos Holográficos (AEH's) representan una innovación revolucionaria en el ámbito de la educación, fusionando tecnología avanzada con métodos pedagógicos tradicionales para transformar la experiencia de aprendizaje. Estos sistemas emplean proyecciones holográficas tridimensionales para crear representaciones virtuales de tutores, instructores o personajes educativos que interactúan con los estudiantes de manera inmersiva y personalizada. La revisión de la literatura sobre Asistentes Educativos Holográficos busca comprender y sintetizar el conocimiento existente en este campo, principalmente identificando avances recientes, evaluando críticamente la literatura existente y detectando áreas de investigación adicionales y contribuciones al campo. En este artículo se busca contribuir a una visión más unificada acerca de los Asistentes Educativos Holográficos y Asistentes Educativos Convencionales, utilizando el análisis comparativo.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 describe la metodología aplicada para seleccionar y analizar las publicaciones; en la Sección 3 se introduce una tipología basada en comparaciones entre los núcleos temáticos; en la Sección 4 se añade discusión y recomendaciones; y la Sección 5 incluye información adicional.

2. MÉTODOS

Para la agrupación de las publicaciones se consideran dos núcleos temáticos (Asistentes Educativos Holográficos y Asistentes Educativos Convencionales). Se realizó la búsqueda de publicaciones desde el 2 de septiembre del 2023 al 14 de marzo del 2024. La estrategia utilizada para la búsqueda de los estudios fue mediante la declaración PRISMA 2020. Se utilizaron las siguientes cadenas de texto:

- holographic artificial intelligent assistant
- holographic educational assistant
- hologram AND conversational assistant
- hologram AND educational assistant
- avatar AND conversational assistant
- educational assistant
- intelligent tutor
- hologram AND conversational assistant
- virtual assistant

Además de implementar la técnica de bola de nieve (*snowball*). Los criterios de inclusión que se consideraron fueron que las publicaciones tenían que ser como mínimo del año 2018 en adelante, en los idiomas español e inglés, y explorar los aspectos utilizados en el contexto educativo.

La extracción de los datos de las publicaciones se realizó mediante la información recopilada de cada una utilizando tablas comparativas. Además, se evaluó cómo los autores validaron y confirmaron los datos a través de formularios, encuestas y entrevistas. Las escalas de medida más utilizadas en las publicaciones para conocer la dispersión, distribución y características de un conjunto de datos fueron Desviación Estándar, Media y Mediana. Las variables más utilizadas incluyen Edad, Grado Académico, Puntuación *Pre-test* y *Post-tes*. Las pruebas estadísticas más usadas fueron la prueba T de *Student* y ANOVA.

Es común encontrarse con información incompleta o ausente en algunas publicaciones. En tales casos, es necesario formular supuestos de manera formal para abordar estas

ISSN: 2992-8338

carencias y permitir una interpretación más completa de los resultados. Si existe ese sesgo, entonces se dará una breve descripción de cómo poder formular estos supuestos.

- **Supuesto sobre la metodología de evaluación.** Si la metodología de evaluación de los asistentes no se detalla exhaustivamente en la literatura revisada, podría suponerse que se utilizaron métodos convencionales de evaluación pedagógica. Estos métodos incluyen pruebas pre y post, observaciones en el aula y encuestas de satisfacción del estudiante.
- **Supuesto sobre la generalización de resultados.** Si las publicaciones revisadas no proporcionan información detallada sobre la diversidad de poblaciones estudiantiles incluidas en los estudios, se podría considerar que los resultados obtenidos se aplican a una población estudiantil diversa en términos de edad, género y nivel educativo.
- **Supuesto sobre la implementación técnica.** La implementación técnica de los asistentes varía significativamente entre estudios y no se proporcionan detalles específicos sobre la configuración técnica utilizada. Se asume que las implementaciones cumplen con los estándares básicos de funcionamiento y capacidad tecnológica.
- **Supuesto sobre la replicabilidad de los resultados.** Considerando que la replicabilidad de los resultados no se aborda explícitamente en las publicaciones revisadas, se podría suponer que los resultados obtenidos en un entorno educativo específico podrían generalizarse y replicarse en otros entornos con condiciones similares.

3. RESULTADOS

En esta sección se ofrece una exposición detallada de todas las fuentes de información y trabajos relevantes que fueron objeto de análisis durante el proceso de investigación. Se proporcionan detalles sobre los criterios utilizados para la selección de dichas fuentes, así como una descripción completa del proceso de evaluación y elegibilidad aplicado. Además, se presenta la cantidad de publicaciones empleadas para evaluar los estudios seleccionados y la división de dichas publicaciones por núcleos temáticos.

Utilizando la declaración PRISMA 2020, se realizaron dos procesos de búsqueda y selección. El primero consistió en la identificación de nuevos estudios a través de bases de datos y registros, de los cuales se obtuvieron 23 publicaciones. De estas, se excluyeron 2 al no cumplir los criterios de inclusión y otra publicación que no se recuperó, resultando en un total de 20 publicaciones incluidas en la revisión en el primer proceso. El segundo proceso de búsqueda y selección fue la identificación de nuevos estudios mediante otros métodos y permitió identificar 27 publicaciones, de las cuales solo se recuperaron 23, por lo que las 4 restantes fueron excluidas. De las 23 publicaciones recuperadas, se excluyeron 19 publicaciones debido a que contenían información irrelevante, por lo que solo 4 fueron incluidas en la revisión. Considerando los resultados de ambos procesos de búsqueda, en total se incluyeron 24 publicaciones para la revisión sistemática.

3.1 Asistentes educativos holográficos

Las publicaciones mencionadas en este apartado se enfocan en aspectos relacionados con un Asistente Educativo Holográfico, que constituye el tema central de esta investigación. Estas obras abordan una variedad de temas, entre los que se incluyen asistentes virtuales, holografía, asistentes educativos, tutores inteligentes, avatares 3D, hologramas y asistentes educativos holográficos. A continuación, se expone de manera concisa la información recopilada de las publicaciones pertinentes a través de tablas comparativas. Estas tablas presentan descripciones de los estudios, así como los algoritmos o técnicas empleadas, el ámbito de investigación junto con el idioma utilizado, las pruebas llevadas a cabo y los resultados obtenidos. Se presentan las Tablas 1, 2 y 3 con base en los AEH's.

3.2 Asistentes conversacionales

Las publicaciones mencionadas en este apartado abordan enfoques relacionados con asistentes en general. Más específicamente en asistentes conversacionales. A continuación, se expone de manera sistemática la información recopilada de las publicaciones relacionadas por medio de tablas comparativas. Las tablas presentan información descriptiva, algoritmos o técnicas empleadas, el ámbito de investigación junto con el idioma utilizado, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Se presentan las Tablas 4 y 5 con base en los asistentes conversacionales.

Durante el proceso de recopilación de información, se encontró una amplia variedad de enfoques relacionados con los asistentes educativos holográficos. Se destaca el trabajo de Keselj et al. (2023), quienes desarrollaron una aplicación holográfica para enseñar geometría a niños. Además, el estudio de Cerezo et al. (2019) se enfocó en la práctica de la pronunciación y vocabulario oral en inglés mediante tecnología holográfica. También se identificó la investigación de Amicis et al. (2019), que exploró el uso de asistentes holográficos en el ámbito de la arquitectura y la construcción. Incluso, se vislumbran proyecciones futuras, como las planteadas por Wei et al. (2023), quienes discuten los posibles escenarios de aplicación y los principios de interacción de los hologramas en cabinas automotrices. No obstante, es crucial reconocer la importancia de identificar posibles sesgos entre los estudios. Estos sesgos pueden surgir debido a variaciones en la metodología de investigación, la selección de muestras, la medición de variables, entre otros factores, lo que podría impactar la interpretación de los resultados. Por tanto, resulta fundamental considerar estas posibles fuentes de sesgo al analizar y sintetizar la evidencia de diferentes estudios, con el fin de asegurar la robustez y validez de los resultados y conclusiones obtenidas.

4. DISCUSIÓN

En esta sección se proporciona una interpretación general de los resultados obtenidos, destacando el progreso significativo alcanzado en áreas clave de investigación y desarrollo. Como ejemplo podemos destacar el proyecto HIVA de Isaev et al. (2023), cuyo AEH ofrece una amplia gama de información sobre *Ala-Too International University*,

ISSN: 2992-8338

cubriendo aspectos como admisión, tarifas, departamentos y servicios en la cafetería, entre otros. Además, destaca por proporcionar una interacción "cara a cara" a través de una mascota animada en 3D. En el ámbito de la inteligencia artificial, las contribuciones relevantes incluyen el trabajo de Duguleaña et al. (2020), en el desarrollo de un asistente conversacional para museos y la investigación de Isaev et al. (2023), sobre la combinación de un avatar 3D con un asistente de voz. Sin embargo, aún existen áreas de oportunidad por explorar, como el desarrollo de asistentes educativos holográficos más económicos en términos computacionales y de hardware, así como la implementación de metodologías innovadoras como las propuestas por Hoon y Shaharuddin (2019). Además, es importante fomentar el desarrollo de estos asistentes en diferentes niveles educativos, dado que el 81.48% de las publicaciones analizadas en este documento se centran en educación superior.

Tabla 1. Tabla comparativa de Asistentes Educativos Holográficos.

Cita	Descripción	Algoritmo, técnica o método usado	Dominio e idioma	Resultados	Conclusión
Isaev et al. (2023).	Tecnología innovadora que combina un avatar en 3D con un asistente de voz para proporcionar una experiencia audiovisual.	Algoritmo de Multinomial *Naive Bayes* (MNB).	Información institucional e inglés.	Se obtuvieron resultados alrededores del 69.5% de precisión.	Se descubrió que los asistentes virtuales servían como objetos de prueba para llegar a los mismos resultados como si se tratara de personas reales.
Girish et al. (2019).	Asistente de Inteligencia Artificial Holográfica, que permite a los usuarios interactuar con un asistente holográfico en 3D utilizando voz.	Redes Neuronales Convolucionales (CNN).	Asistencia educativa y médica e inglés.	La capa convolucional utiliza filtros que se utilizan para detectar estas características específicas en una imagen.	Se hizo una mejora en la precisión de su funcionamiento como el ser menos propenso al ruido y los acentos.
Makris et al. (2021).	Tecnología que aprovecha redes inteligentes para mejorar las experiencias holográficas, CHARITY.	Redes Neuronales Gráficas (GNN's)	Multidominio e inglés.	CHARITY hace una combinación de técnicas de redes, almacenamiento, compresión y gestión dinámica.	Debido a la fase temprana se espera que en el futuro se hallan nuevas tecnologías para respaldar el diseño inicial.
Grace Bartra y Tirado Miranda (2018).	Implementación de un dispositivo holográfico interactivo para mejorar el aprendizaje llamado Ana.	Arquitectura multicapas *Main activities*, *Analyse problem domain*, *Desing*, etc).	Razonamiento matemático y español.	Se obtuvo que, la comprensión y atención de los niños hacia las vocales en un 27.6% y números en un 22.6% con el uso de Ana.	Se mejoró el aprendizaje, antes el porcentaje de aprobación era de 53% y con la implementación del asistente se llegó a un 99%.
Wei et al. (2023).	Exploración del potencial de las pantallas holográficas tridimensionales en el futuro de las cabinas de automóviles.	Modelo de datos basado en las respuestas visuales, auditivas (VACP)	Automovilismo e inglés.	Después de una serie de investigaciones Con pruebas de concepto, se propusieron y analizaron las tendencias futuras de desarrollo.	La visualización holográfica actual no está lo suficientemente madura como para aparecer en vehículos de producción en masa a corto plazo.

ISSN: 2992-8338

Tabla 2. Tabla comparativa de Asistentes Educativos Holográficos (continuación).

Cita	Descripción	Algoritmo, técnica o método usado	Dominio e idioma	Resultados	Conclusión
Keselj et al. (2023).	Desarrollo de *HoloGeometry* para ayudar a los estudiantes a aprender objetos geométricos, ya que proporciona una visualización de sólidos geométricos.	No especificado.	Conceptos de geometría e inglés.	Debido a que se tiene un prototipo, no se tienen datos relevantes.	Proporciona una visión general de las tecnologías de visualización holográfica, sus capacidades de interacción e integración móvil.
Cerezo et al. (2019)	Desarrollo de una aplicación móvil holográfica para enseñar inglés básico como segundo idioma, a niños de habla española.	Tecnología de proyección en 3D a cámara completa *HologrаFX*.	Practica de la pronunciación y vocabulario oral en inglés.	Con una muestra de 70 niños, se dividieron en 3 grupos, uno sin la aplicación, otro con la aplicación sin holografía y el ultimo con la aplicación holográfica, donde este último destaco con un 65% de aprobación.	Los resultados del experimento de *pre-test* y *post-test* confirman que los niños tuvieron un mejor rendimiento al aprender y practicar utilizando el asistente holográfico.
Orcos et al. (2019).	Implementación de una metodológica utilizando el holograma como medio de enseñanza para el aprendizaje.	No especificado.	Áreas y volúmenes geométricos en inglés.	Una muestra de 78 alumnos, 38 para el proceso experimental, donde resulto con 3.9% de aprobación con respecto al 0.05% antes de la prueba.	Se obtuvieron porcentajes de 97.4% que los estudiantes recomendarían al holograma como medio de enseñanza.
Orcos y Magreñán (2018).	Implementación de hologramas para mejora el aprendizaje de los contenidos de la división celular.	*Socrative Teacher*®.	Conceptos de división celular e inglés.	Los estudiantes se dividieron en dos fases, con y sin el uso del holograma, en el *pre-test* se obtenía en promedio de 0.05 de aprobación, mientras que el *post-test* un promedio de 2.55 de aprobación de respuestas.	Los resultados permiten considerar el uso de la holografía como un medio de enseñanza potencial, así como una herramienta altamente motivadora.
Hoon y Shaharuddin (2019).	Aplicación de tecnología holográfica tridimensional (3DH) para estudiantes de primero, segundo y tercer grado.	Holograma piramidal aplicando efecto *Pepper's Ghost*.	Desarrollo vegetal e inglés.	Una muestra de 50 alumnos donde aumento un 71.55% en respuestas correctas en el *post-test*, en comparación con el 13.45% del *pre-test*.	Los puntajes demuestran que la tecnología 3DH puede influir positivamente y mejorar el conocimiento adquirido durante el proceso de aprendizaje de los estudiantes.
Tayeh e Issa (2020).	Técnica de visualización para modelos de construcción y hologramas interactivos y valida su efectividad.	*BIM-data* y complemento para *Autodesk Revit*.	Arquitectura, construcción e inglés.	Una muestra de 55 estudiantes, donde el 67% se les hizo más fácil identificar las estructuras usando la aplicación holográfica.	La holografía en entornos educativos tiene el potencial de permitir que los profesores y alumnos tengan mayor y mejor oportunidades de interacción.

ISSN: 2992-8338

Tabla 3. Tabla comparativa de Asistentes Educativos Holográficos (continuación).

Cita	Descripción	Algoritmo, técnica o método usado	Dominio e idioma	Resultados	Conclusión
Loh y Shukhaila (2019).	Análisis exhaustivo del estudio de caso del holograma tridimensional como herramientas de aprendizaje digital.	Holograma piramidal aplicando efecto *Pepper's Ghost*.	Conceptos de holografía e inglés.	El uso de la tecnología de hologramas en 3D puede captar la atención de los niños y mejorar su proceso de aprendizaje.	Basándose en la observación, la animación de hologramas en 3D logra captar el interés de los estudiantes y atraer su atención.
Duguleaña et al. (2020).	Desarrollo de un agente conversacional inteligente que se construyó para mejorar la accesibilidad a la información dentro de un museo de historia.	RASA NLU.	Asistente informativo e inglés.	Se hicieron 5 preguntas a 250 participantes, de edad entre los 13 y los 18 años, donde un promedio de 81% dijeron que el asistente les parecía atractivo.	Se muestra buenos niveles de aceptación tanto de los visitantes como del personal del museo, dada la flexibilidad de la implementación del asistente holográfico.
Ali et al. (2019).	Marco multimodal para agentes virtuales inteligentes para aplicaciones interactivas en museos, jardines botánicos y lugares similares.	Interacción multimodal basada en la mirada y el habla.	Botánica e inglés.	Se hicieron 3 consultas donde la consulta A fue la carga del mapa de anclaje y requirió reconocimiento de objetos. La consulta B fue una conversación general. La consulta C fue sobre flores y requirió reconocimiento de objetos.	Los agentes virtuales respondieron dentro de los 2-4 segundos posteriores a la consulta del usuario.
Rosales et al. (2018).	Sistema híbrido inteligente con agentes evaluando los niveles de interacción de la Interacción Humano-Computadora (HCI).	Sistema de Inferencia Difuso definida por 6 escalas de niveles de interacción.	Asistente informativo e inglés.	Muestra de 500 usuarios que visitaron el museo interactivo “El Trompo”, donde el sistema neuro difuso tuvo una exactitud de 91.3%.	Se explora la evaluación de la interacción en la HCI utilizando la Teoría de Niveles de Interacción de Gayesky y Williams para mejorar la experiencia del usuario.
Mawardani et al. (2021).	Mejora de habilidades de representación matemática de los estudiantes después de usar el Módulo de Aprendizaje Multimedia (MLM) con simulación de hologramas.	Módulo de aprendizaje multimedia (MLM).	Análisis matemático e inglés.	Muestra de 35 estudiantes donde los estudiantes trabajan en preguntas sobre matemáticas antes y después de usar el MLM, el cual aumento el promedio de aciertos en un 76%, comparado al 36% antes de usarlo.	El MLM holográfico facilita la comprensión de las habilidades de representación matemática de los estudiantes, al mismo tiempo que fomenta el aprendizaje independiente.

ISSN: 2992-8338

Tabla 4. Tabla comparativa de Asistentes Conversacionales.

Cita	Descripción	Algoritmo, técnica o método usado	Dominio e idioma	Resultados	Conclusión
Sprengholz y Betsch (2021).	Desarrollo de *Survey Mate*, asistente virtual extensión de *Google Assistant*.	Extensión del asistente de *Google*.	Psicología e inglés.	Con un total de 240 personas al azar se les pidió utilizar *Survey Mate*, donde se detectó un 28% de procrastinación y un 7% de timidez.	*Survey Mate* cumple con los requisitos para un uso razonable para la recopilación de datos psicológicos.
Rubio et al. (2022).	Asistente virtual integrable y adaptable a entornos virtuales para entregar información actualizada de aspectos administrativos y procedimentales.	Algoritmo de Multinomial *Naive Bayes* (MNB).	Conversacional y español.	Se midió la probabilidad de respuesta correcta donde dio un 0.12% de error.	UBOT enfatiza en aspectos comunicacionales de socio-afectividad para lograr una comunicación más cercana con los estudiantes y profesores.
Anastasiadou et al. (2020).	Prototipo de un Asistente Virtual Educativo (EVA) diseñado para aumentar la participación de las personas en la gestión de la diabetes.	Modelo de aprendizaje profundo (*Transformers*).	Médico especializado en diabetes e inglés.	De 3266 preguntas hechas, solo tuvo un 1.96% de error al no entender las preguntas.	Se realizaron 3,266 preguntas a EVA, donde 491 fueron en inglés, 367 eran en español y 82 al asistente en búlgaro.
Elshan et al. (2023).	Construcción de proceso de influencia de sistema de inteligencia artificial proceso de aprendizaje del estudiante (SPADE).	No especificado.	Conversacional educativo e inglés.	Solo se hicieron pruebas de laboratorio que muestran que SPADE puede capacitar a expertos para desarrollar asistentes personales.	SPADE es útil para ayudar a los expertos en el dominio a crear asistentes personales efectivos en diferentes ámbitos.
Henne et al. (2023).	Asistente digital basado en la IA conversacional DIAS (Asistente Digital Inteligente para Estudiar y Enseñar).	*Machine Learning* aplicando *Blockchain*.	& Conversacional educativo e inglés.	El prototipo estaba en desarrollo, por lo que no se llegó a fase experimental.	Se espera una implementación, donde se creará un ejemplar de un *front-end* mediante una aplicación *iOS* o *Android*.
Mai (2022).	Creación de un *chatbot* para la evaluación de cómo los estudiantes perciben y aceptan la tecnología en la educación (Merlin).	Combinación de 12 módulos de aprendizaje multimedia.	Tutor educativo para clases en línea e inglés.	Muestra de 102 estudiantes, se aplicó un cuestionario, donde el 81% se sentían satisfechos con el uso de Merlin.	Se crea un nuevo sistema de aprendizaje innovador y un nuevo modelo para el aprendizaje en línea e híbrido.

ISSN: 2992-8338

Tabla 5. Tabla comparativa de Asistentes Conversacionales (continuación).

Cita	Descripción	Algoritmo, técnica o método usado	Dominio e idioma	Resultados	Conclusión
Duque Méndez et al. (2018).	Asistente personal inteligente destinado a apoyar a los usuarios para seleccionar material educativo de repositorios de objetos de aprendizaje.	Razonamiento basado en casos (CBR).	Conversacional educativo e inglés.	Muestra de 153 estudiantes para llenar la base de datos con lo que se darían para el proceso de recomendación comienza a partir de los criterios de búsqueda que pueden expresarse mediante palabras clave.	Se demuestra la posibilidad de utilizar la técnica de CBR en el asistente personal inteligente para recomendar objetos de aprendizaje.
Darma et al. (2019).	Determinación de la viabilidad del Módulo de Aprendizaje Multimedia (MLM) para ayudar en la comprensión de los conceptos de física.	Módulo de Aprendizaje Multimedia (MLM).	Física e inglés.	60 estudiantes evaluarían a 3 evaluadores en total del MLM, donde se calificaría su estructura, organización del material y el lenguaje. Donde el evaluador 3 tendría un promedio de 86.7%.	El MLM puede ser utilizado como medio para el aprendizaje, de modo que los estudiantes puedan aprender de forma independiente y facilitarles la comprensión, especialmente en el aprendizaje de física.

REFERENCIAS

Ali, G., Le, H.Q., Kim, J., Hwang, S.W., and Hwang, J.I. (2019). Design of seamless multi-modal interaction framework for intelligent virtual agents in wearable mixed reality environment. In Proceedings of the 32nd International Conference on Computer Animation and Social Agents, 47-52.

Anastasiadou, M., Alexiadis, A., Polychronidou, E., Votis, K., and Tzovaras, D. (2020). A prototype educational virtual assistant for diabetes management. In 2020 IEEE 20th international conference on bioinformatics and bioengineering (BIBE), 999-1004. IEEE.

Cerezo, R., Calder´on, V., and Romero, C. (2019). A holographic mobile-based application for practicing pronunciation of basic english vocabulary for spanish speaking children. International Journal of Human-Computer Studies, 124, 13-25.

Ciechanowski, L., Przegalinska, A., Magnuski, M., and Gloor, P. (2019). In the shades of the uncanny valley: An experimental study of human-chatbot interaction. Future Generation Computer Systems, 92, 539-548.

Clark, L., Pantidi, N., Cooney, O., Doyle, P., Garaialde, D., Edwards, J., Spillane, B., Gilmartin, E., Murad, C., Munteanu, C., et al. (2019). What makes a good conversation? challenges in designing truly conversational agents. In Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems, 1–12.

Darma, R.S., Setyadi, A., Wilujeng, I., Kuswanto, H., et al. (2019). Multimedia learning module development based on sigil software in physics learning. In Journal of Physics: Conference Series, volume 1233, 012042. IOP Publishing.

Amicis, R., Riggio, M., Shahbaz Badr, A., Fick, J., Sanchez, C.A., and Prather, E.A. (2019). Cross-reality environments in smart buildings to advance stem cyberlearning. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 13, 331-348.

Duguleaña, M., Briciu, V.A., Duduman, I.A., and Machidon, O.M. (2020). A virtual assistant for natural interactions in museums. Sustainability, 12(17), 6958.

Duque Méndez, N.D., Rodr´ıguez Mar´ın, P.A., and Ovalle Carranza, D.A. (2018). Intelligent personal assistant for educational material recommendation based on cbr. Personal Assistants: Emerging Computational Technologies, 113–131.

Elshan, E., Ebel, P., S¨ollner, M., and Leimeister, J.M. (2023). Leveraging low code development of smart personal assistants: an integrated design approach with the spade method. Journal of Management Information Systems, 40(1), 96–129.

Girish, P., Shivaji, S.C., Omkar, P., and Shweta, D. (2019). Holographic artificial intelligence assistance. International Journal of Computer Applications, 975(8887), 1-10.

Grace Bartra, R. and Tirado Miranda, A.E. (2018). Dispositivo holográfico interactivo para mejorar el aprendizaje en estudiantes de primer grado de primaria de la iep jan komensky.

Henne, S., Mehlin, V., Schmid, E., and Schacht, S. (2023). The dias project. development of an intelligent digital assistant in higher education.

Hoon, L.N. and Shaharuddin, S. (2019). Learning effectiveness of 3d hologram animation on primary school learners. Journal of visual art and design, 11(2), 93-104.

ISSN: 2992-8338

Isaev, R., Gumerov, R., Esenalieva, G., Mekuria, R.R., and Doszhanov, E. (2023). Hiva: Holographic intellectual voice assistant. In 2023 17th International Conference on Electronics Computer and Computation (ICECCO), 1-6. IEEE.

Keselj, A., Zubrinic, K., Milicevic, M., and Kuzman, M. (2023). An overview of 3d holographic visualization technologies and their applications in education. In 2023 46th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO), 454-459. IEEE.

Loh, N.H. and Shukhaila, S.S.B. (2019). Corporate social responsibility (csr) towards education: The application and possibility of 3d hologram to enhance cognitive skills of primary school learners. International Journal of Business and Society, 20(3), 1036-1047.

Mai, N. (2022). The merlin project: Malaysian students' acceptance of an ai chatbot in their learning process. Turkish Online Journal of Distance Education, 23(3), 31-48.

Makris, A., Boudi, A., Coppola, M., Cordeiro, L., Corsini, M., Dazzi, P., Andilla, F.D., Rozas, Y.G., Kamarianakis, M., Pateraki, M., et al. (2021). Cloud for holography and augmented reality. In 2021 IEEE 10th international conference on cloud networking (CloudNet), 118-126. IEEE.

Mawardani, A., Dwandaru, W.S.B., Nugroho, M.P., et al. (2021). Multimedia learning module (mlm) with hologram simulation to improve students' mathematical representation ability. In 6th International Seminar on Science Education (ISSE 2020), 522-527. Atlantis Press.

Orcos, L., Jord´an, C., and Magre˜n´an, A. (2019). 3d visualization through the hologram for the learning of area and volume concepts. Mathematics, 7(3), 247.

Orcos, L. and Magre˜n´an, ´A.A. (2018). The hologram as a teaching medium for the acquisition of stem contents. International Journal of Learning Technology, 13(2), 163-177.

Rosales, R., Casta˜n´on-Puga, M., Lara-Rosano, F., Flores-Parra, J.M., Evans, R., Osuna-Millan, N., and Gaxiola-Pacheco, C. (2018). Modelling the interaction levels in hci using an intelligent hybrid system with interactive agents: A case study of an interactive museum exhibition module in mexico. Applied Sciences, 8(3), 446.

Rubio, J.M., Neira-Pe˜na, T., Molina, D., and Vidal-Silva, C. (2022). Proyecto ubot: asistente virtual para entornos virtuales de aprendizaje. Informaci´on tecnol´ogica, 33(4), 85-92.

Sprengholz, P. and Betsch, C. (2021). Ok google: Using virtual assistants for data collection in psychological and behavioral research. Behavior Research Methods, 1-13.

Sylaiou, S., Kasapakis, V., Dzardanova, E., and Gavalas, D. (2019). Assessment of virtual guides' credibility in virtual museum environments. In Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics: 6th International Conference, AVR 2019, Santa Maria al Bagno, Italy, June 24-27, 2019, Proceedings, Part II 6, 230-238. Springer.

Tayeh, R. and Issa, R.R. (2020). Interactive holograms for construction coordination and quantification. Journal of Management in Engineering, 36(6), 04020079.

Wei, H., Xu, J., Jiang, J., Liang, B., and Jia, Q. (2023). Holographic display in future automotive smart cockpit: application scenarios, interaction modals, and vacp analysis. In Advanced Fiber Laser Conference (AFL2022), volume 12595, 200-209. SPIE.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Chaotic systems-based audio encryption: An approach to communication security

Evelyn Bahena Bustamante * **Gloria Lilia Osorio Gordillo** *
Rodolfo Amalio Vargas Méndez *
Daniela Hernández Castañeda *

* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos.*
E-mail: m23ce094@cenidet.tecnm.mx

Abstract: Nowadays cryptography plays a crucial role protecting the integrity of communication in the society. In particular, the application of chaotic concepts in cryptographic systems has generated great interest in recent years. Chaotic systems offer nonlinear and unpredictable behavior, which makes them ideal for multimedia data encryption. This paper presents the use of a chaotic mask to encrypt audio without altering the file structure. Three chaotic systems: Lorenz, Rossler, and Nwachioma, are used to evaluate how chaotic masking affects their unique characteristics. The research seeks to understand how this approach influences the dynamics of the systems and its implications in terms of security.

Keywords: Criptografía, sistemas caóticos, comunicaciones seguras

1. INTRODUCCIÓN

La comunicación ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de las sociedades, ya que la integridad del mensaje es crucial para garantizar su correcta recepción. Para protegerlo de posibles interceptaciones, manipulaciones o suplantaciones por parte de individuos no autorizados, se recurre a la criptografía, un componente esencial desde tiempos remotos (Bonilla, 2021).

La criptografía, cuyo propósito principal es salvaguardar datos críticos almacenados en dispositivos o transmitidos a través de canales inseguros (Alenezi et al., 2020), despliega su importancia en la era digital actual. Un sistema de comunicación se considera seguro cuando es capaz de preservar la confidencialidad de la información ante cualquier intento de acceso no autorizado (N. Augustine, 2015).

Durante las últimas dos décadas, ha habido un gran interés por parte de científicos e ingenieros en las aplicaciones del caos en el ámbito de las comunicaciones seguras, debido a que estos son sistemas no lineales que exhiben trayectorias limitadas y un comportamiento no periódico. Este comportamiento se caracteriza por oscilaciones erráticas o irregulares que no se repiten, y se manifiesta en condiciones totalmente deterministas, ya que siguen leyes bien definidas sin ninguna aleatoriedad (Liñán et al., 2007).

Otra característica, dada la naturaleza de las señales caóticas, es que tienden a ser de banda ancha, similares al ruido y difíciles de prever; se pueden emplear en diversos contextos para ocultar formas de onda que contengan información (Cuomo et al., 1993).

Los sistemas criptográficos basados en el caos poseen múltiples características que los hacen idóneos para cifrar datos multimedia como: imágenes, vídeos o archivos de audio. Algunas de estas características incluyen un comportamiento impredecible, sensibilidad a los parámetros de control y condiciones iniciales (Albahrani, 2017).

Para alcanzar el objetivo de cifrar información, se han propuesto diversas estrategias como el enmascaramiento caótico (Cuomo et al., 1993), la conmutación caótica (Dedieu et al., 1993) y la modulación caótica (Wu and Chua, 1993).

La conmutación caótica y la modulación caótica presentan sus propias ventajas y vulnerabilidades en términos de seguridad y eficiencia. Sin embargo, en este artículo se propone el uso del enmascaramiento caótico para cifrar un archivo de audio WAV. Este método ofrece una combinación de eficiencia temporal, menor complejidad computacional y alta seguridad en el cifrado, lo que lo hace preferible para proteger la información del audio sin dañar la estructura del archivo.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presentan los sistemas caóticos utilizados para cifrar el audio. La estructura del sistema de comunicación utilizado se detalla en la Sección 3. Posteriormente, en la Sección 4 se describen las técnicas de cifrado. El proceso seguido para cifrar el audio se explica en la Sección 5. Los análisis y resultados obtenidos se presentan en la Sección 6, mientras que en la Sección 7 se realizan las conclusiones sobre el enfoque de cifrado empleado.

2. SISTEMAS CAÓTICOS

El objetivo principal de este documento consiste en implementar el enmascaramiento caótico en tres sistemas específicos: Lorenz, Rossler y Nwachioma. La intención es explorar y analizar el efecto del enmascaramiento caótico en cada sistema, evaluando cómo las características únicas de cada uno se ven afectadas por este proceso.

ISSN: 2992-8338

La elección de estos sistemas caóticos se basa en sus características y su idoneidad:

- Lorenz: Como uno de los modelos más conocidos y estudiados de sistemas caóticos, cuenta con una amplia investigación y aplicación que respaldan su idoneidad para el cifrado.
- Rossler: Este modelo, bien estudiado y conocido por su simplicidad y comportamiento caótico, es capaz de producir una variedad de comportamientos dinámicos complejos, lo que lo hace adecuado para implementaciones prácticas en sistemas de cifrado.
- Nwachioma: Aunque menos conocido, este modelo presenta un comportamiento caótico robusto y propiedades interesantes. Su relativa novedad puede ofrecer ventajas en términos de seguridad

En la siguiente sección se muestran tres sistemas caóticos, sus parámetros y comportamientos dinámicos.

2.1 Sistema caótico de Lorenz

El sistema clásico de Lorenz se caracteriza por un conjunto de tres ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) acopladas de primer orden, las cuales se expresan en coordenadas adimensionales (Munmuangsaen and Srisuchinwong (2018)), como se describe en la Ecuación (1)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y-x), \\ \dot{y} &= x(r-z)-y, \\ \dot{z} &= xy-bz. \end{aligned} \tag{1}$$

Los parámetros del sistema son $a = 10$, $r = 28$ y $b = 8/3$, los cuales han resultado en la generación de un atractor caótico autoexcitado, que comúnmente se visualiza como la forma de una mariposa (Lorenz, 1963).

En la Figura 1 se muestra la simulación del sistema caótico de Lorenz, con los parámetros designados y con las condiciones iniciales elegidas como $[0.1; 0.1; 0.1]$.

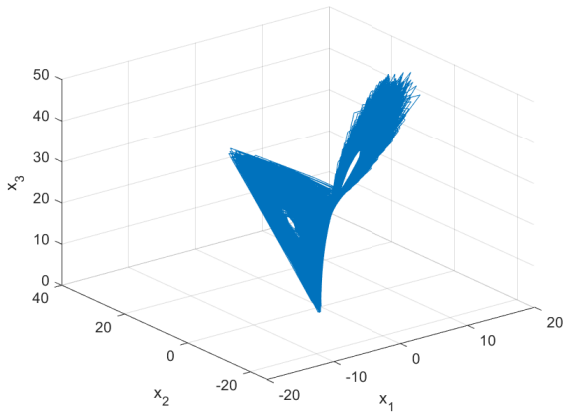


Fig. 1. Sistema caótico de Lorenz

Donde se puede apreciar la forma "mariposa" del comportamiento caótico del sistema de Lorenz en su representación gráfica en el espacio tridimensional. Esta representación visualiza cómo evolucionan las variables del sistema en función del tiempo, proporcionando una visión única de su dinámica.

2.2 Sistema caótico de Rossler

El sistema tridimensional de Rössler se ideó inicialmente como un modelo básico para explorar el fenómeno del caos. Al tener solo un término no lineal, puede entenderse como una versión simplificada del reconocido sistema de Lorenz, sirviendo así como un modelo elemental para el estudio del caos en el tiempo continuo (Ibrahim et al., 2018). Las tres ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) se describen en la Ecuación (2)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -y-z, \\ \dot{y} &= x+ay, \\ \dot{z} &= b+z(x-c). \end{aligned} \tag{2}$$

Los valores explorados inicialmente por Rössler fueron $a = b = 0.2$, junto con $c = 5.7$ y con condiciones iniciales $[0.1; 0.1; 0.1]$. En la Figura 2 se muestran sus resultados de simulación.

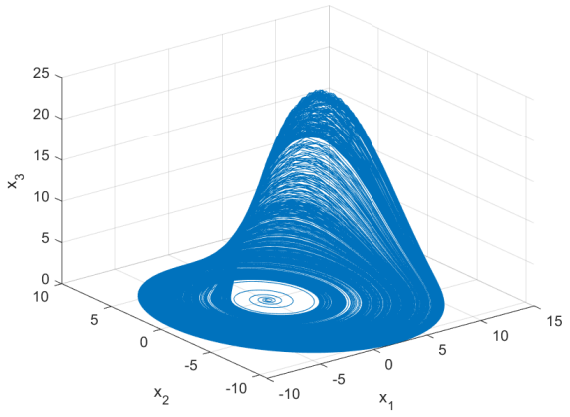


Fig. 2. Sistema caótico de Rossler

En la gráfica de la Figura 2 el sistema de Rössler, se puede observar un comportamiento dinámico complejo que se manifiesta en forma de trayectorias intrincadas en un espacio tridimensional. Estas trayectorias pueden aparecer como una serie de hélices o estructuras en espiral que se entrelazan entre sí.

2.3 Sistema caótico de Nwachioma

En 2019 se presentó un sistema dinámico no lineal autónomo tridimensional. Los resultados de la simulación muestran que este sistema presentan órbitas aperiódicas que están limitadas en el espacio y exhibe una sensibilidad significativa a las condiciones iniciales (Nwachioma et al. (2019)). Las tres ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) se describen en la Ecuación (3)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_1x_1 + a_2x_1x_3 + a_3x_2x_3, \\ \dot{x}_2 &= a_4x_2 + a_5x_1x_3 + a_6, \\ \dot{x}_3 &= a_7x_3 + a_8x_1^2x_2 + a_9. \end{aligned} \tag{3}$$

Se puede establecer que este sistema presenta un régimen caótico para los siguientes parametros: $a_1 = -0.1$ $a_2 = 0.15$, $a_3 = 0.18$, $a_4 = 3.9$, $a_5 = -1.5$, $a_6 = -4$, $a_7 = -4.9$, $a_8 = 2.5$, $a_9 = 0$ (Nwachioma et al., 2019), en la Figura 3

ISSN: 2992-8338

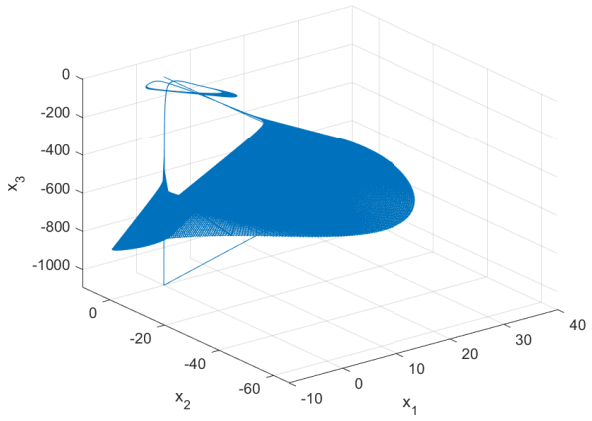


Fig. 3. Sistema caótico de Nwachioma

Las trayectorias observadas en el sistema de Nwachioma muestran un comportamiento que aparenta ser circular pero irregular. Este comportamiento es un reflejo de la dinámica altamente compleja y no lineal del sistema, donde la aparente regularidad se ve interrumpida por su sensibilidad a las condiciones iniciales

3. SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Un sistema de comunicación puede ser descrito como un conjunto de componentes que permanecen en interacción entre sí, facilitando un intercambio de información entre dos o más partes. Los elementos que lo componen son:

- El **emisor** es aquel que inicia el proceso de comunicación, enviando el mensaje. Su función principal es la de transmitir la información deseada al receptor.
- El **mensaje** es la información que se transmite desde el emisor al receptor. Puede tomar diversas formas, como texto, voz, imágenes, o datos.
- El **codificador** se refiere al proceso que lleva a cabo el emisor al organizar o crear el mensaje, y consiste en el conjunto de símbolos, códigos y reglas que guían la transmisión de la información.
- El **canal** es el medio a través del cual se transmite el mensaje. Puede ser un cable, una señal inalámbrica, o cualquier otro medio físico o digital que permita el flujo de información.
- El **decodificador** es el proceso realizado por el receptor para comprender el mensaje recibido. A menudo implica la inversión del proceso llevado a cabo por el emisor, es decir, la traducción de los símbolos o códigos utilizados en el mensaje de vuelta a su forma original.
- El **receptor** es aquel que recibe y procesa el mensaje enviado por el emisor. Su función es interpretar la información transmitida y, en algunos casos, responder adecuadamente según el contexto de la comunicación.

de comunicación en su totalidad (Frenzel, 2022), (Mesiya, 2013). En la Figura 4 se muestra el diagrama de un sistema de comunicación

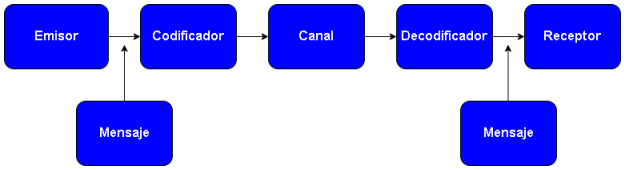


Fig. 4. Diagrama de un sistema de comunicación

4. CIFRADO DE MENSAJE

El cifrado es un proceso mediante el cual se convierte un mensaje legible en una forma oculta o incomprensible, utilizando un algoritmo y generalmente una clave. Esto se hace para proteger la confidencialidad de la información durante su transmisión o almacenamiento, ya que hace que el mensaje sea difícil o imposible de entender para aquellos que no poseen la clave adecuada. En resumen, el cifrado sirve para garantizar la privacidad y seguridad de la información al convertirla en una forma que solo puede ser entendida por las partes autorizadas que poseen la clave para descifrarla. Dependiendo del tipo de clave utilizada, las técnicas de cifrado se dividen en dos categorías:

4.1 Cifrado de clave simétrica (secreta)

Se trata de un método de cifrado en el que tanto el emisor como el receptor utilizan una misma clave secreta tanto para cifrar como para descifrar la información. Este enfoque, también conocido como criptografía de clave secreta, emplea una sola clave para ambas funciones (Kansal and Mittal, 2014).

4.2 Cifrado de clave asimétrica (pública)

En este tipo de cifrado, se emplean dos claves distintas, una pública y otra privada, para el proceso de cifrado y descifrado. Cada una de estas claves cumple una función específica: una se utiliza para cifrar y la otra para descifrar, y viceversa. Aunque diferentes, ambas claves son complementarias entre sí (Kansal and Mittal, 2014).

5. ALGORITMO PROPUESTO PARA EL CIFRADO DE UN AUDIO

La entrada al algoritmo propuesto es un archivo de audio que será cifrado utilizando un método de cifrado simétrico, donde tanto el emisor como el receptor comparten una clave secreta para el proceso de cifrado y descifrado. Este enfoque de seguridad garantiza que la misma clave secreta se utilice tanto para ocultar como para revelar la información, lo que simplifica el proceso de cifrado y descifrado.

En este caso particular, las condiciones iniciales de los sistemas caóticos se utilizarán como la clave secreta compartida entre el emisor y el receptor. Estas condiciones

ISSN: 2992-8338

iniciales son valores específicos que determinan el estado inicial del sistema caótico y son fundamentales para el comportamiento dinámico del sistema. Al utilizar las condiciones iniciales como clave secreta, aseguramos que tanto el emisor como el receptor puedan cifrar y descifrar el audio utilizando la misma información inicial, lo que simplifica el proceso de comunicación cifrada.

5.1 Condiciones de software

(1) **Carga del audio:** Se emplea la función **audioread** para cargar el archivo de audio en formato .WAV. En este artículo se cifrará un audio llamado: "HolaMundo.wav"

(2) **Normalización del audio:** La normalización del audio ajusta su amplitud para garantizar que los valores de las muestras estén dentro de un rango deseado, generalmente entre -1 y 1. Este proceso es útil para evitar distorsiones o sobrecargas en la señal, especialmente al trabajar con diferentes archivos de audio que pueden tener niveles de volumen distintos. La normalización se logra al dividir cada muestra de la señal por su valor máximo absoluto.

(3) **Definición de parámetros y condiciones iniciales:** Se definen los parámetros del sistema caótico y se eligen las condiciones iniciales deseadas, en este caso de alguno de los sistemas mostrados en la Sección 2. Es importante recordar que estas condiciones iniciales serán la clave secreta de cifrado.

(4) **Definición del tiempo de simulación y paso de integración:** Se establece el tiempo de simulación para que sea igual a la duración del audio original, y se elige el paso de integración deseado.

(5) **Simulación del sistema y enmascaramiento del audio:** Se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales del sistema de Lorenz utilizando el solver **ode45** de MATLAB. Durante la simulación, se aplica simultáneamente una función de mapeo (**audio mapping function**) entre el audio normalizado y el sistema caótico. Esta función ajusta la señal de audio para que se integre con el comportamiento del sistema caótico, generando así una señal de audio enmascarada. En cada paso de la simulación, la función de mapeo modifica el audio basándose en el estado actual del sistema caótico.

(6) **Guardado del audio cifrado:** La señal enmascarada se guarda como un nuevo archivo de audio utilizando la función **audiowrite** de MATLAB. Los audios enmascarados se guardarán con el siguiente formato:
`"audio_cifrado_NombreDelSistema.WAV".`

(7) **Visualización del comportamiento del sistema caótico:** Se grafican las trayectorias del sistema caótico en un espacio tridimensional utilizando la función **plot3**. Esta función requiere tres argumentos: las coordenadas x, y y z de los puntos que se van a graficar. En el contexto de los sistemas caóticos, estas coordenadas representan las variables del sistema (x, y, z) en función del tiempo. Cada punto en el gráfico corresponde a un estado específico del sistema en un momento particular en el tiempo. Al trazar estas coordenadas en un espacio tridimensional, se visualiza la trayectoria del sistema a lo largo del tiempo.

6. RESULTADOS

El audio original a cifrar, titulado "HolaMundo.wav", se puede observar en la Figura 5. Este audio, que tiene una duración de cuatro segundos, contiene un mensaje clave que se cifrará utilizando el método propuesto en este trabajo.

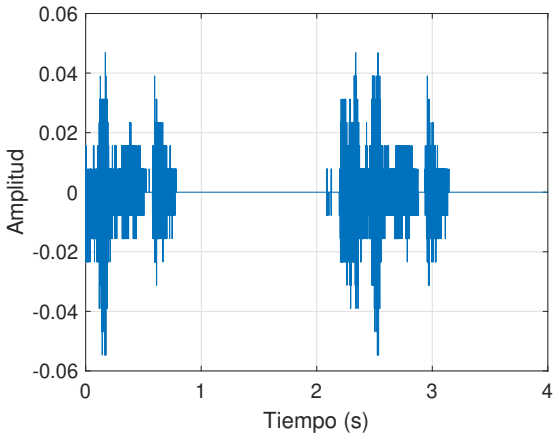


Fig. 5. Forma de onda del audio a cifrar "Hola Mundo"

A continuación, se presentarán tanto las figuras que muestran el comportamiento del sistema enmascarado en un espacio tridimensional como la forma de onda del audio enmascarado. Estas representaciones nos permiten visualizar las trayectorias del sistema caótico enmascarado a lo largo del tiempo, así como la evolución de la señal de audio resultante. Cada punto en el gráfico tridimensional corresponde a un estado específico del sistema en un momento particular en el tiempo, lo que ayuda a comprender mejor cómo se comporta el sistema enmascarado bajo diferentes condiciones iniciales y parámetros. A través de estas figuras, se puede analizar y evaluar la efectividad del proceso de enmascaramiento para cifrar la información de manera segura y confiable.

6.1 Cifrado con el sistema caótico de Lorenz

Al aplicar el procedimiento de cifrado y seleccionar cuidadosamente las condiciones iniciales o la clave secreta ($[0.1; 0.1; 0.1]$), se genera una representación visual del sistema caótico de Lorenz, tal como se muestra en la Figura 6. Esta representación nos permite observar el audio enmascarado, revelando su comportamiento y evolución a lo largo del tiempo.

ISSN: 2992-8338

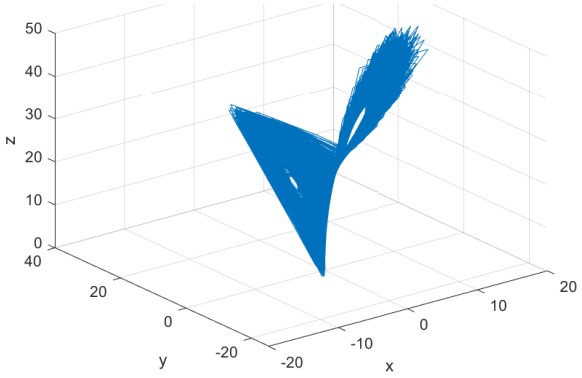


Fig. 6. Audio enmascarado utilizando el sistema de Lorenz

Al observar la Figura 6, se puede notar que aparentemente no hay ningún cambio en el comportamiento del sistema caótico al enmascarar el audio. La Figura 7 ilustra la comparación de la forma de onda del audio original y del audio enmascarado, mostrando cómo se comporta en relación con el sistema caótico.

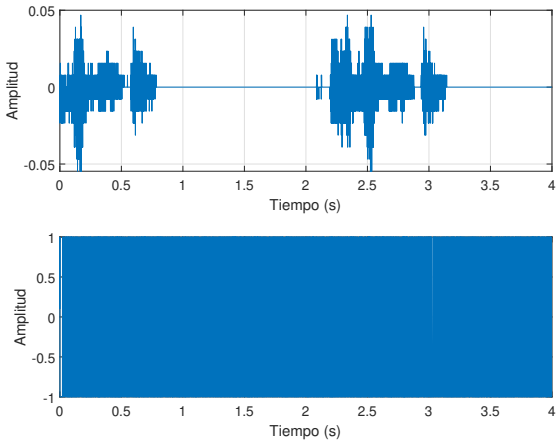


Fig. 7. Comparación del Audio Original y el Audio Enmascarado utilizando el sistema de Lorenz

6.2 Cifrado con el sistema caótico de Rossler

Al seguir el algoritmo de cifrado y elegir con detenimiento las condiciones iniciales o la clave secreta ($[0.1; 0.1; 0.1]$), se produce una representación visual del sistema caótico de Rossler, como se muestra en la Figura 8. Esta representación incluye el audio cifrado, exhibiendo su comportamiento y evolución a lo largo del tiempo.

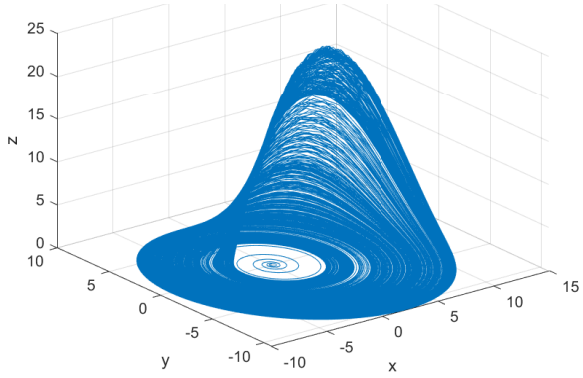


Fig. 8. Audio enmascarado utilizando el sistema de Rossler

Al analizar la Figura 8, se evidencia que el comportamiento del sistema caótico pareciera no experimentar cambios al enmascarar el audio. La Figura 9 compara las formas de onda del audio original y del audio cifrado, ofreciendo una perspectiva de su comportamiento en relación con el sistema caótico.

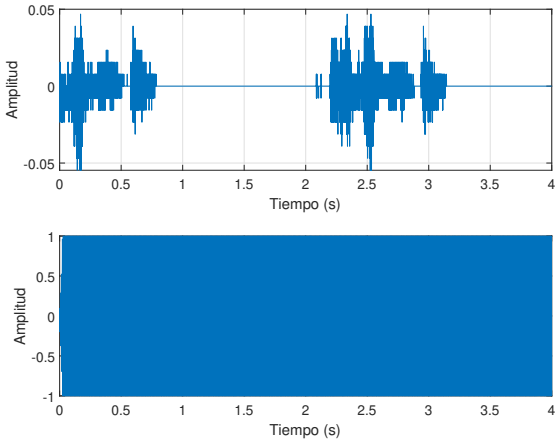


Fig. 9. Comparación del Audio Original y el Audio Enmascarado utilizando el sistema de Rossler

6.3 Cifrado con el sistema caótico de Nwachioma

Al seguir el proceso de cifrado y seleccionar minuciosamente las condiciones iniciales o la clave secreta ($[0.1; 0.1; 0.1]$), se obtiene una representación visual del sistema caótico de Nwachioma, como se presenta en la Figura 10. Esta representación muestra el audio cifrado, revelando su comportamiento y desarrollo a lo largo del tiempo.

ISSN: 2992-8338

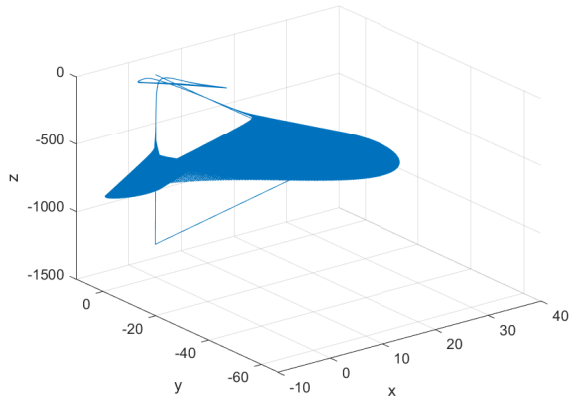


Fig. 10. Audio enmascarado utilizando el sistema de Nwachioma

Al examinar la Figura 10, se confirma que el comportamiento del sistema caótico se mantiene al enmascarar el audio. La Figura 11 presenta una comparación entre las formas de onda del audio original y del audio cifrado, proporcionando una visión de su comportamiento en relación con el sistema caótico.

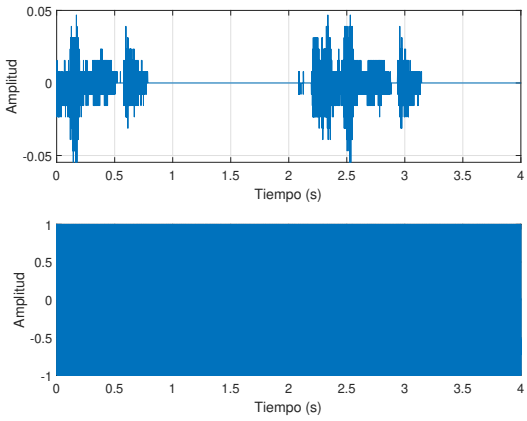


Fig. 11. Comparación del Audio Original y el Audio Enmascarado utilizando el sistema de Nwachioma

7. CONCLUSIÓN

El empleo del enmascaramiento caótico para cifrar señales de audio ofrece una fascinante perspectiva sobre la interacción entre los sistemas caóticos y la información digital. Se ha observado que, si bien el enmascaramiento introduce alteraciones en la forma de onda de la señal original, el comportamiento general del sistema caótico no experimenta cambios significativos. Esta observación sugiere que el enmascaramiento caótico puede preservar la esencia del sistema mientras se garantiza la seguridad de la información transmitida.

Además, se ha confirmado que el audio enmascarado conserva la misma duración que el audio original cifrado. Este requisito fundamental asegura la coherencia temporal entre los mensajes cifrados y descifrados, lo que facilita su integración en sistemas de comunicación en tiempo real.

Como trabajo futuro, se explorará la posibilidad de emplear técnicas de control para permitir que el receptor descifre el audio original a partir del audio enmascarado.

REFERENCES

Albahrani, E.A. (2017). A new audio encryption algorithm based on chaotic block cipher. *Annual Conference on New Trends in Information Communications Technology Applications (NTICT).*

Alenezi, M., Alabdulrazzaq, H., and Mohammad, N. (2020). Symmetric encryption algorithms: Review and evaluation study. *International Journal of Communication Networks and Information Security.*

Bonilla, S.J. (2021). Algoritmo de cifrado de audio digital mediante atractores caóticos. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas.*

Cuomo, K., Oppenheim, A., and Strogatz, S. (1993). Synchronization of lorenz-based chaotic circuits with applications to communications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II.*

Dedieu, H., Kennedy, M.P., and Hasler, M. (1993). Chaos shift keying: modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing chua's circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II.*

Frenzel, L. (2022). *Principles of electronic communication systems.* McGraw Hill.

Ibrahim, K., Jamal, R., and Ali, F. (2018). Chaotic behaviour of the rossler model and its analysis by using bifurcations of limit cycles and chaotic attractors. *In Journal of Physics: Conference Series.*

Kansal, S. and Mittal, M. (2014). Performance evaluation of various symmetric encryption algorithms. *International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing.*

Liñán, R., Ángel, J., and Morales, L. (2007). Sincronización de caos mediante observadores para cifrado en comunicaciones. *Ingenierías, UANL.*

Lorenz, E. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences.*

Mesiya, M. (2013). *Contemporary communication systems,.* McGraw Hill,.

Munmuangsaen, B. and Srisuchinwong, B. (2018). A hidden chaotic attractor in the classical lorenz system. *Chaos, Solitons Fractals.*

N. Augustine, S.N. George, D.P. (2015). An audio encryption technique through compressive sensing and arnold transform. *International Journal of Trust Management in Computing and Communications.*

Nwachioma, C., Pérez-Cruz, J., and Jimenez, A. (2019). A new chaotic oscillator—properties, analog implementation, and secure communication application. *IEEE Access.*

Wu, C.W. and Chua, L.O. (1993). simple way to synchronize chaotic systems with applications to secure communication systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos.*

ISSN: 2992-8338

Application of Last Planner System: a case study

Rodríguez-Treviño, Jorge Antonio*. Flores-Hernández, Alberto Arturo*. Galván-Rodriguez, Daniel Gonzalo*. González Almaguer, Alan de León*.

**Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Matamoros, Carretera Lauro Villar Kilómetro 6.5, Tecnológico, 87490 Heroica Matamoros, Tamps. MEX (Tel:868-135-5855; e-mail: M22260838@matamoros.tecnm.mx).*

Abstract: The present investigation addresses the problem of construction work, which consists of the delay of activities; collisions between different collaborators, generating bottlenecks; and the lack of commitment by the staff. These problems were addressed through the philosophy of Lean Manufacturing, which when applied to the construction industry is known as Lean Construction. The main contribution of this research is that a methodology was established to solve these problems through a flow chart applying Last Planner System. The initial phase of the methodology consists of developing the activities that make up the master plan of the entire work. Next, using the lookahead, the following 3 to 6 weeks are planned and the appropriate restrictions are established, to corroborate whether the weekly work plans are met. If this occurs, the appropriate documentation is made for continuous improvement, otherwise the weekly work plans are restructured. The results show that it was possible to recover the planned times through the development of the new master plan and comply with the schedule.

Keywords: Last Planner System, Lean Construction, plan maestro, lookahead, plan semanal.

INTRODUCIÓN

El concepto de Lean Manufacturing tiene su base en la ideología de trabajo “just in time o justo a tiempo” realizada por el inventor Japones Sakichi Toyoda. Lean Manufacturing es un proceso continuo y sistemático de identificación y eliminación del desperdicio o exceso, entendiendo como exceso toda aquella actividad que no agrega valor en un proceso, pero sí costo y trabajo (Socconini, 2019) . Esto se logra mediante los principios de la filosofía lean, los cuales son (Gómez-Álvarez, 2024):

1. Define el valor desde el punto de vista del cliente (Valor).
2. Identifica tu corriente de valor (Cadena de valor).
3. Crea flujo (Flujo de valor).
4. Producir según el sistema pull (tirar) en vez de push (empujar).
5. Persigue la perfección (Mejora continua KAIZEN).

Lean, se ha integrado en otros sectores como logística, servicio, operaciones y construcción, entre otros. Este trabajo, se enfoca en la aplicación de Lean en el ámbito de la construcción de obras civiles.

En la literatura, se encuentran diferentes conceptos de Lean Construction (LC), por ejemplo, en (Institute, 2024) se menciona que el concepto aborta los objetivos de un sistema de producción ajustada para maximizar el valor y minimizar los desperdicios mediante técnicas específicas, y las aplica en un nuevo proceso de entrega y ejecución del proyecto. En (Institute, 2024) se dice que LC está dirigido a la reducción de desperdicios, aumento de la productividad y mejora de la salud ocupacional en la obra, es decir, la prevención de accidentes y la seguridad del trabajador, para cumplir con las normas y estándares de la industria de la construcción.

Una de las principales metodologías para lograr esto es Last Planner System (LPS), que consististe en un sistema de planificación y control de la producción para proyectos de construcción (Vázquez-Noguerol et al., 2018).

En general, LPS busca reducir los desperdicios y maximizar la seguridad dentro de la obra, mediante las herramientas que lo conforman. Las cuales son plan maestro, lookahead, planificación semanal, sala OBEYA y gemba walk.

Plan maestro consiste en planificar adecuadamente las principales actividades que conforman al proyecto, con el objetivo de incrementar la productividad. El plan maestro en LC se aplica en la eliminación de esperas, la ejecución de secuencias y la coordinación de la interdependencia de las múltiples actividades a realizar (Rojas, et al., 2017). Dentro del plan maestro desarrollamos el lookahead, el cual consiste en una planificación a mediano plazo que abarca de tres a seis semanas en el futuro (Oroz Tito, 2015). Para que el último planificador identifique las sub-áreas necesarias y tener una visión cercana al desarrollo del proyecto, que permita desarrollar un plan semanal certero.

La planificación semanal elabora un plan de trabajo a corto plazo, con una duración de una a dos semanas haciendo que los involucrados se comprometan con las metas establecidas. Para ello, el último planificador debe de cumplir con un contrato y fechas determinadas. La planificación semanal en LC se utiliza para una gestión eficaz de las actividades a ejecutar, quien las realizará, a que se comprometió y que muestre un avance real (ACHELL, 2019).

El espacio donde se realiza el programa del plan maestro, lookahead y planificación semanal se denomina sala OBEYA. Esta sala se enfoca en potenciar la gestión visual para aumentar

ISSN: 2992-8338

la accesibilidad y el flujo de información (GARRIDO, 2020). Mejorando la comunicación permitiendo que el equipo tenga acceso a información actualizada. Haciendo que haya una mejor colaboración generando confianza y resolución de problemas. En LC la sala OBEYA se emplea para facilitar las ideas complejas y transparentar la información a los representantes de las áreas del proyecto (GARRIDO, 2020).

La retroalimentación del trabajo de campo consiste en ir al lugar de los hechos o gemba walk, teniendo como objetivo conocer el proceso, observar y verificar el proceso de lo que está ocurriendo (Zambrano, 2020). Esta herramienta se utiliza en LC para "detectar problemas y acudir a la causa raíz recopilando información de todas las fuentes" (Araujo et al., 2019).

En general, las partes que conforman a LPS se han aplicado a LC en una gran cantidad de proyectos. Por ejemplo, en (Sanchis, 2013) que consiste en una empresa de construcción, en Santiago de Chile. El proyecto se constituye de tres torres de viviendas de diez plantas. La implementación de LPS empezó en la torre número dos. Al momento de aplicar la herramienta hubo quejas por parte de los colaboradores, esto cambió en el momento que notaron la eficacia y eficiencia de la herramienta. Para la torre número tres, el compromiso fue del cien por ciento habiendo una mejora significativa en el control diario de todos los procesos. En conclusión, notaron que la herramienta esta para ayudar al desempeño de su trabajo. (Mestre, 2013)

Por otra parte, es fundamental que el principal responsable de la cadena de mando sea quien tenga la disposición de hacer la mejora. Por ejemplo, en (Botero, 2014), desarrollaron un proyecto que constituye un edifico de nueve pisos con un sótano. El problema principal fue el tiempo de ejecución debido a un retraso en la cimentación. Por lo que, el director de obra tomó la decisión de recurrir a un facilitador que se encargará del control de la programación de obra.

Establecieron una pull sesión por cinco semanas, para establecer el lookahead y las actividades semanales. Tuvieron resistencia al cambio en un inicio, con los colaboradores que no tenían intención alguna de comprometerse. Sin embargo, conforme pasaron las semanas observaron que el LPS es una herramienta con potencial para resolver sus problemas de retraso.

En este trabajo, se desarrolla e implementa LPS en un proyecto de construcción con la problemática en el tiempo del programa de obra. La constructora se especializa en el suministro, fabricación y montaje de estructuras metálicas y todo tipo de techados como naves industriales.

La constructora se encargó de la expansión de una empresa de pintura. Las problemáticas a las que se enfrentaron fueron la inasistencia de los colaboradores en los lunes, la mala planeación dentro de las actividades planteadas, la falta de coordinación entre los contratistas, la falta de material en el sitio, la falta de supervisión y el nulo trabajo en equipo. Se elevaron los costos y se tuvieron que aplazar las fechas de entrega de cada hito generando un retraso general en todo el proyecto.

METODOLOGIA

Los principios de gestión de LPS son:

- Las actividades no deben comenzar antes de que todos los requerimientos para la realización de estas sean satisfechos.
- Se debe medir y monitorizar la realización de las actividades.
- Se debe evitar la pérdida de productividad.
- Para realizar una programación a corto plazo, se debe considerar solo aquellas actividades para ser ejecutadas que no cuenten con restricciones.

A partir de los principios de LPS se identificaron las problemáticas que causaron el retraso de la obra. Se planteó la metodología de solución a estos problemas mediante un diagrama de flujo aplicando Last Planner System, como se muestra en la figura 1. Las etapas de la metodología son:

1. Diseñar las actividades que conforman el plan maestro. Por ejemplo, planificación y diseño del proyecto; preparación del terreno; cimentación; estructura (obra negra); instalaciones de servicios (obra gris); acabados (obra blanca); inspección y pruebas (calidad).
2. Planificación de las tres a seis semanas de trabajo de la obra, estableciendo un lookahead sección de la obra.
3. Detallar en la planificación semanal del área de cada sección.
4. Supervisión y monitoreo de cumplimiento de objetivos semanales.
5. Si los objetivos semanales se cumplen se hace la documentación oportuna para la mejora continua, en caso contrario se reestructuran los planes de trabajo semanales.

La metodología se implementó en la semana #25 y concluyendo en la semana #28. La primera reunión de inicio o pull sesion se realizó en la sala OBEYA, con todos los responsables de cada sección, desde la gerencia de proyecto, hasta el ayudante de cada disciplina. El objetivo de la reunión fue explicar en que consiste la herramienta de LPS y su función en el desarrollo de la obra. Esto con el objetivo de conocer y familiarizarse con ella. Una vez implementada realizaremos reuniones diarias para revisión de avance de obra y medir los objetivos planeados.

ISSN: 2992-8338

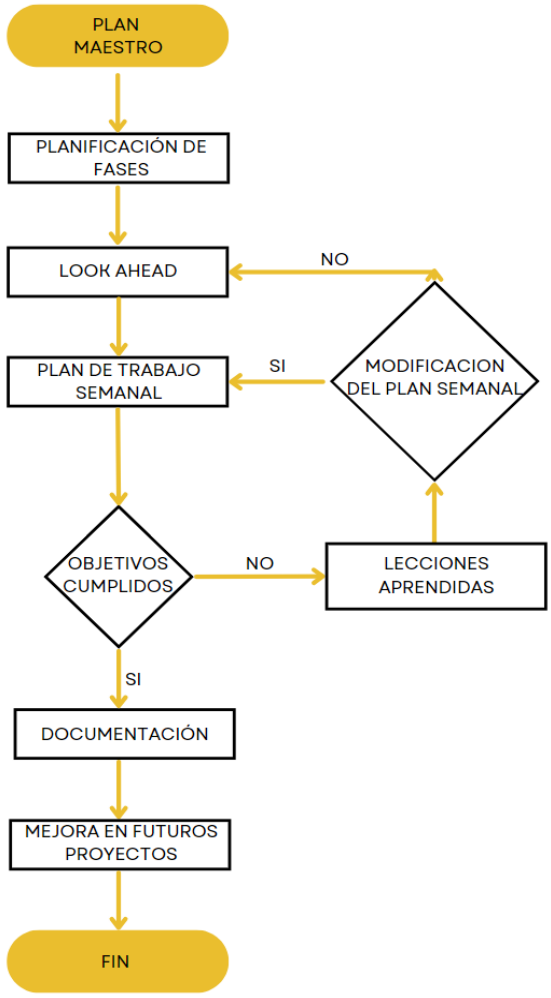


Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología empleada.

DESARROLLO

En el trabajo de obras de construcción con la colaboración de más de un contratista, se sabe que hay restricciones que causan los retrasos. En este caso se presentaron las siguientes cuestiones a revisar que se abordaron y con el uso de herramientas de LPS se pudieron identificar las posibles soluciones en forma de listado.

1.- Falta de personal los lunes: Como parte de la solución se promovieron incentivos para laborar este día y se tuviera más productividad.

2.- Mala planeación: Se habilitó una sala OBEYA en la obra, como se muestra en la figura 1, donde se procedió a realizar el Tack Planning o Pull Sesión, dando así la introducción y la aplicación a la herramienta LPS.

3.- Falta de coordinación: Una vez que los colaboradores se familiarizaron con la metodología, empezaron a desarrollar la planeación para una óptima coordinación.

4.- Falta de materiales en el sitio: Una vez calendarizado los plazos de ejecución de cada actividad corresponde al planificador coordinar las entregas de material en puntos estratégicos.

5.- Poco seguimiento de las tareas: Se le dio seguimiento a este punto, programando un gemba walk todos los martes a las 10 am para su respectiva revisión de avance.

En la figura 4 (ubicada en anexos), se muestra la planificación de la semana #25, antes de iniciar con la metodología establecida de LPS. A partir de esta semana se implementó la nueva planificación.

RESULTADOS

Planificación de fases

Las aplicaciones del sistema se aplicaron en la semana #25 del proyecto por lo que se convocó a una reunión con los involucrados en las actividades que presentaban retraso, dicha sesión se realizó en la sala OBEYA, la mayoría desconocía la metodología LC y por consiguiente desconocían LPS, se dio una explicación detallada sobre su estructura, metodología, aplicación y beneficios que se obtienen tanto para el proyecto como para ellos como ejecutores.

Lookahead

Se requirió que cada contratista proporcionara fecha de inicio y termino de sus respectivas actividades. Una vez que se estableció, se programó de derecha a izquierda. Inmediatamente se inició con la entrega de "Post-It" solicitando a los contratistas colocaran las actividades y el cliente del que dependen para comenzar dicha actividad pudiendo identificar las restricciones.

Plan semanal de trabajo

Se utilizó un formato en excel de LPS para llevar el registro. Este formato se compartió a cada contratista para su propia programación y mapeo de sus actividades semanales. Dicho formato fue revisado de manera diaria en apoyo con una reunión con duración de 20 minutos máximo en el que el contratista retroalimenta con el estatus de sus avances. Al finalizar la primera semana, se programó una reunión los jueves a las 17:00 horas para revisión general y planeación de la semana próxima.

Objetivos cumplidos

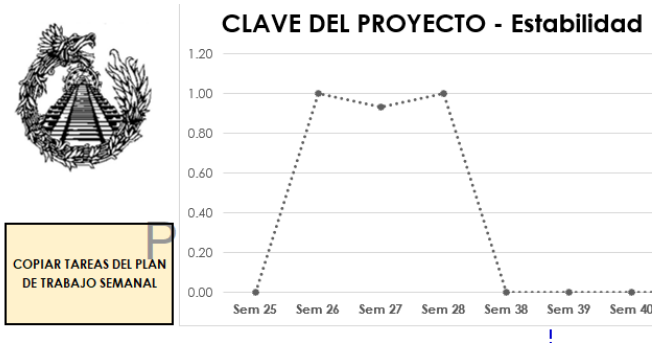
En la Figura 4, (ubicada en el anexo), se programaron 10 actividades de las cuales no se cumplió ninguna al 100 % en la semana #25, identificando las causas de no cumplimiento y las restricciones que no permitieron cumplir con los compromisos programados.

Posteriormente a la revisión de la programación de la semana #25, se identificaron las restricciones o lecciones aprendidas. Estas lograron modificar el lookahead, por lo tanto, también modificó el plan semanal. Se programaron las mismas actividades para la semana #26 ya que estas son las que presentan mayor retraso. Sin embargo, fue necesario agregar las actividades de la semana #26 al volumen de obra que no se

ISSN: 2992-8338

pudo completar de la semana #25, quedando de la manera en que se observa en la figura 5, (ubicada en el anexo) semana #26.

Para la semana #27 y #28 se recupero el retraso de la semana #25. Apreciando el incremento en las actividades en la siguiente gráfica, que se muestra a continuación. La respuesta y compromiso por parte de los involucrados, así como la oportuna identificación y atención de las causas de no cumplimiento. La correcta identificación de las restricciones y colisiones con las otras actividades ayudó a tomar decisiones oportunas en sitio. La metodología establecida en el diagrama de flujo sirvió para documentar lo aprendido y mejorar en los proyectos a futuro.



Semana	Sem 25	Sem 26	Sem 27	Sem 28	Sem 38	Sem 39	Sem 40	Sem
EST	0.00	1.00	0.93	1.00	0.00	0.00	0.00	0.0
Tareas Programadas	10	10	15	18				
Tareas Completas	0	10	14	18				

Figura 2 Gráfica de resultados comparativa de la metodología implementada

CONCLUSION

El implemento de LPS en la obra fue de gran ayuda, los trabajos que estaban programados a ciertas semanas, normalmente se recorrían generando retrasos. Por ejemplo, en comparación de la semana #25 con las semanas #27 y la #28 se puede apreciar que hay un incremento en las metas cumplidas. Los contratistas aprendieron a trabajar en equipo de manera que ellos también resultaron beneficiados, coordinándose para evitar los cuellos de botella. El residente de obra tenía más control en la colocación de los materiales en lugares estratégicos, haciendo de este un mejor acceso a él, minimizando el tiempo de esperas. Sobre todo, el personal se comprometió, ya que se sintieron también parte del proyecto. La implementación de las metodologías de investigación tales como LPS, se considera que son de gran ayuda en una industria en donde se generan diferentes tipos de desperdicio. Se espera el continuo uso de estas. Generando así un cambio positivo en este sector.

REFERENCIAS

ACHELL, J. F. . I. R. P. (2019). *LEAN CONSTRUCTION Y LA PLANIFICACIÓN COLABORATIVA METODOLOGÍA DEL LAST PLANNER® SYSTEM* (Número Abril).

Araujo, A. L., Avila, K. A., Barbaran, C. M., Castillo, F. V., y Chinchihualpa, J. L. (2019). *Implementación de herramientas Lean Construction en proyectos multifamiliares de densidad media . Caso Proyecto Precursores en Surco.* https://doi.org/http://doi.org/10.19083/tesis/648717

Botero Toro, P. (2014). *Un proyecto en Marcha con Last Planner System*. *November*, 1–108.

GARRIDO, L. F. F. (2020). *DISEÑO DE ESTÁNDARES DE IMPLEMENTACIÓN DE OBEYA ROOMS PARA LA GESTIÓN DE PROYECTOS EN ETAPA INVERSIONAL DE CONSTRUCCIÓN*. *2017*(1), 1–184. http://190.119.145.154/handle/20.500.12773/11756

Gómez-Álvarez Rafael Paniagua. (2024). *FILOSOFÍA LEAN - Conceptos y principios*. ESIC Editorial. https://www.google.com.mx/books/edition/FILOSOFÍA_LEAN/NSr8EAAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0&kptab=overview

Oroz Tito, C. F. (2015). Aplicación De Herramienta De Planeamiento Look Ahead En Construcción De Proyecto Inmobiliario Multifamiliar De 10 Pisos. *Universidad Ricardo Palma*, 167.

Rojas López, M. D., Henao Grajales, M., y Valencia Corrales, M. E. (2017). Lean construction – LC bajo pensamiento Lean. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *16*(30), 115–128. https://doi.org/10.22395/rium.v16n30a6

Sanchis, I. (2013). El Last Planner System System. *Last Planner System: Un caso de estudio*, 1–177.

Socconini, L. (2019). Limitantes de la Productividad. En *Lean Manufacturing Paso a Paso* (Vol. 1). https://books.google.co.cr/books?id=rjyeDwAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

Vázquez-Noguerol, F. M., Rodríguez-García, M., y Prado-Prado, J. C. (2018). Aplicación de técnicas Lean Construction a través de un método de Action Research en los procesos de gestión de una empresa constructora. *Direccion y Organizacion*, *65*, 1–90. https://doi.org/10.37610/dyo.v0i65.530

Zambrano. (2020). *LEAN-BIM en edificación vertical. Mejora de gestión de proyectos hacia la sustentabilidad: Caso de estudio en Zapopan, Jalisco*. https://rei.iteso.mx/handle/11117/6479

ISSN: 2992-8338

ANEXOS



Figura 3 Reunión en sala OBEYA.

LAST PLANNER SYSTEM

CONTRATISTA:		GENERAL CONTRACTOR	
TOTAL DE ACTIVIDADES PLANEADA	10	Semana:	25
TOTAL DE ACTIVIDADES TERMINADA	0	Fecha:	24/06/2023
PORCENTAJE DE PLAN COMPLETO	0%	Contratista	

Actividad	Descripcion de la tarea	Claro y definido	Sin restricciones	Seguro	Dentro del plan	Tamaño suficiente	o Volumen	Area (Donde)	Responsable Ejecutor	LUN	MAR	MIER	JUE	VIE	SAB	DOM	Terminado 100% S/N	Cliente que aceptó	CAUSA DE NO CUMPLIMIENTO
1	CONSTRUCCION DE MUROS DE BLOCK EJE 3	S	S	S	S	S	75 M2	AEROSOLES	DAYITSA	5	5	5	5	8	0	0	N		Mano de Obra
2	CONSTRUCCION DE MUROS DE BLOCK EJE A	S	S	S	S	S	75 M2	AEROSOLES	GEROCA	0	0	0	8	6	0	0	N		Mano de Obra
3	CONSTRUCCION DE MUROS DE BLOCK EJE 1	S	S	S	S	S	90 M2	AEROSOLES	GEROCA	0	0	0	0	0	0	0	N		Mano de Obra
4	COSNTRUCCION DE MUROS DE BLOCK INTERIORES MEZZANINE	S	S	S	S	S	110 M2	AEROSOLES	GEM	0	0	0	0	0	0	0	N		Mano de Obra
5	MONTAJE DE TUBERIA DE AGUA DE PROCESOS	S	S	S	S	S	60 ML	TANQUE NUEVO	CYMESA	6	6	12	12	0	0	0	N		Coordinación
6	MONTAJE DE TUBERIA DE VAPOR	S	S	S	S	S	50 ML	CALDERAS	CYMESA	12	12	6	6	0	0	0	N		Inspecciones
7	MONTAJE DE TUBERIA CONDENSADO	S	S	S	S	S	60 ML	CALDERAS	DAYITSA	0	0	0	0	0	0	0	N		Coordinación
8	MONTAJE DE TUBERIA DE NITROGENO INERTE	S	S	S	S	S	18ML	PASILLO 5	DAYITSA	0	0	0	0	0	0	0	N		Mano de Obra
9	MONTAJE DE TUBERIA DE SOLVENTES	S	S	S	S	S	42ML	PASILLO 5	CYMESA	0	0	0	0	0	0	0	N		Mano de Obra
10	MONTAJE DE TUBERIA DE NITROGENO	S	S	S	S	S	50 ML	PASILLO 6	CYMESA	0	0	0	1	0	0	0	N		Materiales

Página

Figura 4 Resultados de la semana #25 sin aplicar LPS.

LAST PLANNER SYSTEM

CONTRATISTA:		GENERAL CONTRACTOR	
TOTAL DE ACTIVIDADES PLANEADA	10	Semana:	26
TOTAL DE ACTIVIDADES TERMINADA	10	Fecha:	01/07/2023
PORCENTAJE DE PLAN COMPLETO	100%	Contratista	

Actividad	Descripcion de la tarea	Claro y definido	Sin restricciones	Seguro	Dentro del plan	Tamaño suficiente	o Volumen	Area (Donde)	Responsable Ejecutor	LUN	MAR	MIER	JUE	VIE	SAB	DOM	Terminado 100% S/N	Cliente que aceptó	CAUSA DE NO CUMPLIMIENTO
1	CONSTRUCCION DE MUROS DE BLOCK EJE 3	S	S	S	S	S	122 M2	AEROSOLES	DAYITSA	16	24	36	36	10	0	0	S		
2	CONSTRUCCION DE MUROS DE BLOCK EJE A	S	S	S	S	S	122 M2	AEROSOLES	GEROCA	32	30	48	12	0	0	0	S		
3	CONSTRUCCION DE MUROS DE BLOCK EJE 1	S	S	S	S	S	180 M2	AEROSOLES	GEROCA	0	0	0	0	0	0	0	S		
4	COSNTRUCCION DE MUROS DE BLOCK INTERIORES MEZZANINE	S	S	S	S	S	110 M2	AEROSOLES	GEM	25	25	25	25	10	0	0	S		
5	MONTAJE DE TUBERIA DE AGUA DE PROCESOS	S	S	S	S	S	90 ML	TANQUE NUEVO	CYMESA	36	30	24	0	0	0	0	S		
6	MONTAJE DE TUBERIA DE VAPOR	S	S	S	S	S	90 ML	CALDERAS	CYMESA	0	0	0	36	30	24	0	S		
7	MONTAJE DE TUBERIA CONDENSADO	S	S	S	S	S	96 ML	CALDERAS	DAYITSA	24	24	24	24	0	0	0	S		
8	MONTAJE DE TUBERIA DE NITROGENO INERTE	S	S	S	S	S	36 ML	PASILLO 5	DAYITSA	12	12	12	0	0	0	0	S		
9	MONTAJE DE TUBERIA DE SOLVENTES	S	S	S	S	S	84 ML	PASILLO 5	CYMESA	0	0	0	12	36	36	0	S		
10	MONTAJE DE TUBERIA DE NITROGENO	S	S	S	S	S	84 ML	PASILLO 6	CYMESA	12	36	36	0	0	0	0	S		

Página

Figura 5 Resultados de la semana #26 aplicando LPS

ISSN: 2992-8338

Productivity of technological projects and management of their value as technological and intellectual property intangible assets.

Morales-Lechuga, Víctor Manuel*

**Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) – Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 Ciudad de México. México.*

((Tel: 5556228601 - 1303; e-mail: victor.morales@icat.unam.mx

Abstract: This paper refers to how to improve the productivity of technological development and innovation processes, incorporating the management of their value as technological intangible and intellectual property. It is based on some criteria that consider that typical products or results of R&D activities must be treated with processes and methods specific to the companies' activities to be translated into economic results and competitive advantages. Observing this, it is proposed to improve this productivity by managing the value of R&D as a technological intangible and intellectual property using the TRL (technology readiness level) technological maturation scale. Additional complements to this scale of technological maturation may be in terms of market and business model maturation.

Keywords: Technological development, Technological readiness level "TRL", intellectual property, valuation of intangible assets, technology transfer, innovation, innovation value management, productivity in R&D activities.

1. INTRODUCCIÓN

La innovación tecnológica ha sido objeto de numerosos estudios para comprender cómo ha sido históricamente un factor crucial para el progreso social, económico y del bienestar de la sociedad. La innovación empresarial y su importancia para las organizaciones que quieran ser rentables, sustentables y dinámicas son el impulsor para desempeñar un papel protagónico en un mundo globalizado (Muñoz L. 2020). A través de este proceso se conciben nuevas ideas que permiten establecer nuevas estructuras organizativas, introducir al mercado nuevos productos o servicios, o bien simplemente mejorar los procesos existentes (Vega, Cuellar, Choque y Sánchez 2020). Sin embargo, podemos asegurar que la mera generación de ideas o invenciones no garantiza un efecto positivo en la innovación. A raíz de esto, se han propuesto directrices que buscan gestionar de manera efectiva el valor de uso de los resultados de los proyectos tecnológicos en particular, y de las actividades tecnológicas a nivel institucional (Johannsen, Schaller y Kluns 2021). Este trabajo busca reflexionar sobre este tema y proponer la integración de esquemas de gestión del valor basados en prácticas recomendadas por normas internacionales de gestión de la innovación, considerando además que los conocimientos tecnológicos deben estructurarse como bienes intangibles formalmente generados y gestionados para su introducción en las prácticas empresariales.

2. LA PRODUCTIVIDAD DE LAS UNIDADES DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

2.1 Laboratorio de I&D como sistema

Visto de una forma, se parte de analizar el efecto que tienen las actividades de investigación y desarrollo en ámbitos de la industria y actividad económica diferentes a los originalmente considerados (Choi y Lee, 2021), sin embargo visto de manera más fundamental, esta productividad podría estar más en función de la los resultados obtenidos por los recursos empleados en el desarrollo de los proyectos, y dichos resultados cómo se traducen en las actividades comerciales e industriales en términos de generación de beneficios económicos. De acuerdo con Brown y Svenson (1998) un esquema práctico de evaluar la productividad de la llamada Investigación y Desarrollo ("I&D" en español o "R&D" en inglés) es considerando al laboratorio de I&D como un sistema.



Figura 1. El laboratorio de I&D como sistema. Adaptado de Brown y Svenson (1998)

La Figura 1 muestra el esquema propuesto por Brown y Svenson (1998), el cual tiene dos sistemas de procesamiento. El primero es el procesamiento de las actividades mismas de I&D el cual al procesar insumos (inputs) que son recursos

ISSN: 2992-8338

típicamente asignados a las actividades propiamente de I&D se obtienen resultados (outputs) típicos de la I&D. El segundo sistema es el llamado "sistema receptor", que se puede considerar como la parte emprendedora o del sector productivo, quienes procesan el conocimiento y resultados de la I&D, identificando ventajas competitivas y oportunidades de mercado. Es en este segundo sistema donde se incorporan metodologías y acciones propias de la industria que, al ser puestos en la práctica con la pertinencia económica, técnica y de mercado, son convertidos o expresados como resultados monetarios propios de la innovación.

Cabe resaltar que la expresión del conocimiento traducido en este tipo de resultados económicos, son válidos para justificar la existencia de activos intangibles tecnológicos y de propiedad intelectual, conforme normas y prácticas nacionales e internacionales en materia de expresión y valuación de activos intangibles. (Enríquez, S. F., Noriega, A. E. O., & Montijo, F. C. 2017), y en la forma de su reporte formal de las actividades de las empresas (Loza Vega, I., & Preciado Romero, V. A. 2020).

En este esquema se plantean aspectos importantes de retroalimentación de la evaluación de las actividades de I&D en términos de sus resultados, los insumos empleados y los procesos realizados. Lo mismo sucede en el sistema receptor que, partiendo de estos resultados típicos de la I&D como insumos, evaluaría su efectividad y resultados de sus actividades orientadas a la innovación con los consecuentes resultados económicos. Es notar también que puede y debe existir también una retroalimentación más global de este sistema, al evaluar la efectividad de las operaciones de ambos sistemas (laboratorio de I&D y sistema receptor). Esto puede traducirse en un esquema virtuoso en el cual se pueden mejorar desde la asignación de recursos para la I&D, haciendo con ello más pertinentes los resultados de la I&D para ser traducidos en resultados competitivos y de innovación.

Otros trabajos más recientes en materia de medición de la productividad de las actividades de I&D están más orientadas a actividades que se realizan dentro de las empresas. Uno de estos casos es descrito por Bremser, W. G. y Barsky, N. P. (2004), quienes utilizan el tablero de mando de Kaplan y Norton llamado "*Balanced Scorecard"* para la medición e impacto en los productos financieros de las actividades de investigación y desarrollo y alineados a la estructura estratégica de la empresa.

Otro trabajo que se puede mencionar es el reportado por Coluccia, D., Dabić, M., Del Giudice, M., Fontana, S., y Solimene, S. (2020) quienes, utilizando datos empíricos de gasto y resultados económicos y financieros de determinadas empresas europeas, demuestran la efectividad positiva en de la productividad de la I&D cuando están alineadas en el mediano y largo plazo a las estrategias competitivas de las empresas.

2.2. Productividad desde la perspectiva de los objetivos, beneficios y riesgos que se enfrentan los proyectos tecnológicos.

Trabajos como los anteriormente mencionados consideran la gestión de las actividades, procesos y resultados de la I&D desde una perspectiva organizacional. En este sentido, en la actualidad se pueden identificar como factores clave para el éxito de actividades tecnológicas los siguientes:

- Los insumos o recursos para la innovación, en términos de: cantidad, pertinencia, personal, recursos físicos y financieros; herramientas y métodos para la I&D y para la innovación;
- La Gestión del Conocimiento: en términos del soporte existente para la generación de ideas, repositorios del conocimiento de las organizaciones, flujos y apropiación del conocimiento;
- Estrategia de innovación: en forma de su orientación y liderazgo;
- Cultura organizacional y organización; en forma de estructura, aspectos culturales, reconocimiento, recompensas, participación, y colaboración entre otros aspectos;
- Gestión del portafolio de proyectos: en términos del reconocimiento y evaluación del riesgo/beneficio, recursos y profesionalización de la gestión;
- Gestión de proyectos: eficiencia de los proyectos, herramientas para su gestión y control, comunicaciones y colaboraciones;
- Comercialización: investigaciones, estrategias y pruebas de mercado.

Algunos de estos factores han sido considerados en diversos estudios, como el presentado por Nandal, D. N., Kataria, D. A., y Dhingra, D. M. (2020), en el cual se hace un balance de las mejores prácticas reportadas e implementadas en las empresas. Este trabajo sugiere que la medición de las actividades de innovación sea exhaustiva y mida actividades y características compuestas. Sugiere que incluya un conjunto de aproximadamente ocho a doce métricas, distribuidas en tres categorías de métricas: entradas, procesos y salidas. Todo lo anterior enmarcados en una cultura y estructuras organizacionales que van más allá del laboratorio o grupo de investigación, o incluso de la organización misma. Así se puede visualizar considerado el esquema básico propuesto por por Brown y Svenson (1998).

Sin embargo, no se puede hablar de productividad global de un sistema sin considerar la productividad de los elementos fundamentales que lo componen. En el caso del desarrollo tecnológico a partir de las actividades de I&D siempre se ha considerado la necesidad de que el grupo de investigación visualice las oportunidades tecnológicas desde los inicios del desarrollo. Se trata de tomar en cuenta aspectos clave que son determinantes en su efecto en el valor del conocimiento generado en las actividades de I&D que pueden ser determinantes en el aprovechamiento de las oportunidades y ventajas competitivas que se pueden derivar del uso del conocimiento generado. Esto se puede lograr incorporando a los elementos típicos de gestión de proyectos de I&D acciones con las que se pretenden no solo identificar y evaluar oportunidades y ventajas competitivas sino formalizar técnica, económica y jurídicamente los resultados que se generan en la I&D para ser útiles en las etapas posteriores al desarrollo tecnológico.

ISSN: 2992-8338

3. EVALUACIÓN DE VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA – MONITOREO DE LA ESCALA DE MADURACIÓN TECNOLÓGICA (TRL)

La evaluación de las viabilidades técnicas y económicas de un proyecto tecnológico en curso no puede desligarse del estado en el que se encuentra. Esto significa que se debe considerar por una parte el proceso de maduración tecnológica, y la generación de elementos necesarios para lograr una evaluación técnica y económica de los resultados que en este proceso se van generando. Implica incluir, en la gestión del valor de proyectos de ciencias aplicadas y la innovación resultante, el concepto de la escala de maduración tecnológica o TRL por sus siglas en inglés.

Olechowski, A., Eppinger, S. D., y Joglekar, N. (2015) describen cómo la escala de maduración tecnológica (TRL) fue introducida por la NASA en la década de 1970, como una herramienta para evaluar la madurez de las tecnologías durante el desarrollo de sistemas complejos. Esta escala es ahora un estándar utilizado para la evaluación y supervisión de tecnología en muchas industrias y programas gubernamentales de apoyo a proyectos tecnológicos como el caso del CONACYT en México (Gutiérrez, M. y Zavala, N., 2018).

Integrar el uso de la escala TRL en la gestión del valor de la innovación es crucial para comprender y mitigar los riesgos inherentes a cada fase del proyecto. Trabajos como el reportado por Engel, Dalton, Anderson, Sivaramakrishnan y Lansing, (2012). En este trabajo se han propuesto elementos útiles en la evaluación del riesgo del proceso de desarrollo tecnológico respecto a la escala de maduración tecnológica TRL. Evalúa determinados requisitos que deben ser cubiertos de manera mínima en el caso de una tecnología dependiendo del nivel de maduración. Al final se puede calcular o evaluar el riesgo existente de un proyecto en función de qué tanto se han cubierto estos requerimientos. A continuación, exploraremos cómo aplicar estrategias de gestión del valor de manera muy simplificada en cada nivel de la escala TRL agrupado en tres grandes bloques:

1. TRL 1-3: Investigación Conceptual y Laboratorio

En esta parte se enfoca al desarrollo de base conceptual lo más firme y sólida posible para que, a través de su validación, existan elementos conceptuales de base para la futura tecnología. En esta parte se considera que la diferenciación respecto del estado de la técnica es la base del desarrollo, misma que le dará la ventaja competitiva. Una parte importante de esta etapa de TRL, y quizá en todo el proceso de maduración, es lo referente considerar el estado de la técnica relacionado con la literatura, pero más respecto a las patentes. Se trata de identificar si existe actividad de patentamiento en lo referente a los conocimientos mismos como en sus aplicaciones. En algunos casos, se decidirán el patentamiento preliminar de algunos de los posibles aplicaciones o desarrollos, anticipando sobre todo las posibles divulgaciones que suceden propias de las actividades académicas como trabajos de tesis, congresos, publicación de artículos, etc.

Un aspecto importante que no se menciona en el recorrido del proyecto en esta escala de maduración tecnológica es la toma de decisiones en torno a los resultados y perspectivas de desarrollo futuras. Opciones de continuar, redirigir enfoques, abandonar los planteamientos, pero sobre todo evaluar críticamente los resultados son aspectos que de no darse en esta y en las siguientes fases se corre el riesgo de seguir invirtiendo en el proyecto, diferir las decisiones y hacer más costosas las decisiones.

2. TRL 4-6: Desarrollo y Validación en Entornos Simulados y Controlados

En esta etapa de escalas de TRL se avanza en la validación de conceptos en torno a determinadas aplicaciones, sobre todo en el objetivo tecnológico planteado. En esta etapa no solo se requiere de avanzar en resultados más sólidos técnicamente hablando sino introducir los aspectos de mercado y del modelo de negocio a ser desarrollado.

Nuevamente y en esta fase el monitoreo del estado de la técnica sobre todo en la validación de aspectos de propiedad intelectual sigue siendo fundamental. Se debe buscar proteger la tecnología en prácticamente todas sus expresiones, como son el producto, el proceso, las operaciones y los requerimientos de equipamientos específicos, incluyendo elementos de Know how y secretos industriales a ser considerados.

La divulgación en esta fase puede ser altamente costoso y limitativo en caso de la posibilidad de obtener patentes al respecto. Varios elementos surgen en este nivel que incluso deben ser tratados de manera confidencial para preservar el valor exclusivo del valor de uso que se genera.

Puede ser que en esta parte surgen opciones y datos que permiten tener un perfil de los costos, los insumos necesarios, requisitos de operación y sobre todo la viabilidad técnica del desarrollo. Los lotes comerciales de prueba pueden ser importantes para obtener la sensibilidad del mercado.

3. TRL 7-9: Demostración en Entornos Operativos y Comerciales

Las etapas finales de la escala de maduración tecnológica permiten no solo implementar la tecnología en plenas capacidades, sino considerar aspectos estratégicos En estas etapas finales, la tecnología se somete a pruebas en entornos operativos y comerciales reales. La gestión del valor se centra en maximizar el impacto y la adopción de la tecnología. Es fundamental demostrar la eficacia y el valor práctico de la tecnología para los usuarios finales. Se pueden establecer asociaciones estratégicas y colaboraciones para facilitar la implementación y la comercialización. La retroalimentación del usuario se convierte en un componente clave para ajustar y mejorar la tecnología según las necesidades del mercado.

4. LA PRODUCTIVIDAD DE LOS RESULTADOS DE PROYECTOS TECNOLÓGICOS Y LA GESTIÓN DEL VALOR EN PROYECTOS TECNOLÓGICOS DE CIENCIAS APLICADAS.

4.1 Identificación de Oportunidades.

ISSN: 2992-8338

Como en la mayor parte de casos de éxito de las innovaciones, su base de inicio es la identificación de oportunidades de mercado o de oportunidades derivadas de lo que pudiera representar una aportación importante la forma Identificar oportunidades (Roberts, E. B. 2007). Se pretendería identificar oportunidades de manera creativa, más allá de los planteamientos puros de la ciencia sobre las tendencias, razones para dar solución a algún problema, incluso identificar las necesidades que en futuro pudieran representar retos importantes para la industria, el medio ambiente o de la sociedad.

4.2 Evaluación de la madurez tecnológica:

El uso de la escala de maduración tecnológica ha sido de gran utilidad en procesos de desarrollo tecnológico, muchos de ellos a partir de invenciones o planteamientos que surgen desde la ciencia. No se trata de un modelo de innovación o de desarrollo tecnológico lineal, se trata de identificar y considerar una diversidad de criterios que caso a caso se pueden dar, de modo que al analizarlos se define los parámetros característicos de la maduración del proyecto y perfilar el mapa de ruta de la innovación (Silberer, J., Astfalk, S., Planing, P., y Müller, P. 2023), estableciendo objetivos muy claros y concretos de TRL, programarlos en el tiempo, presupuestarlos, identificar retos, riesgos e incluso dará la oportunidad para que, en caso de resultados diferentes a los esperados, se puedan considerar opciones (Busch, C., y Grimes, M., 2023).

Como complemento a la gestión de los proyectos tecnológicos en la escala TRL, se han propuesto considerar además y de manera paralela gestionar las escalas de maduración de mercado o "market readiness level" y del modelo de negocio "business readiness level", (Hasenauer, R., Gschöpf, A., & Weber, C., 2016).

4.3 Evaluación de Viabilidad y desarrollo tecnológico.

En etapas tempranas de la escala TRL es difícil saber la viabilidad financiera de los proyectos, sin embargo, se pueden es importante en estas etapas los elementos de creatividad, de oportunidad y sobre todo de validación de conceptos. De tal manera que la viabilidad técnica es de los primeros elementos que se van considerando en estos primeros niveles de maduración (Moussa, A., 2022). Ya cuando habiendo sido validados los conceptos se establecen objetivos tecnológicos y se puede contar con elementos más claros de retos, costos y alcances.

4.4 Protección de la Propiedad Intelectual

Un aspecto importante en todo el proceso de maduración tecnológica es, por una parte, identificar y documentar conocimientos susceptibles de ser sujetos de protección de la propiedad intelectual, ya sea de patentes o de otro tipo de figura legal. La propiedad intelectual es la base para establecer elementos legalmente válidos para garantizar el legítimo uso tecnológico, económico y de propiedad de los conocimientos, incluye la secrecía del conocimiento en forma de secretos industriales, que puede ser implementado como un complemento importante de la propiedad intelectual en lo que respecta a el Know how, o incluso recurrir a estos secretos industriales cuando no se cumplen con criterios de patentabilidad de la información, o esperar para contar con mayores y mejores elementos (Holgersson, M., y Aaboen, L., 2019). Podemos asegurar que esto es uno de los elementos fundamentales y de la base legal para establecer los llamados activos intangibles relacionados con la tecnología reconocibles en la estructura económica y contable de las empresas.

Se trata identificar el estado del arte basado en patentes de la tecnología relacionada con el desarrollo, que es válido para observar a competidores actuales, tendencias futuras, forma en que se está protegiendo la tecnología, y sobre todo visualizar y considerar la posibilidad de que lo que se está desarrollando ya se encuentre protegido y que al implementarse pueda responder a invasión de derechos previos (Kim, H. L., Hovav, A., y Han, J., 2020).

4.5 Transferencia de Tecnología y Comercialización

Transferir los resultados del desarrollo de acuerdo con la escala de maduración tecnológica en etapas donde ya es necesario considerar capacidades y conocimientos propios de la manufactura y el contacto más estrecho con el mercado. En estos aspectos, la idea es identificar alianzas estratégicas, colaboraciones o vinculaciones efectivas para el desarrollo, incluye buscar patrocinios o fuentes de financiamiento apropiadas para la fase de emprendimiento.

Es frecuente en instituciones de I&D y universidades que, al momento de comenzar a realizar las funciones de transferencia de tecnología, surgen (hasta con cierto grado de urgencia) algunos procesos. Por ejemplo, la protección de la propiedad intelectual y el saber cuánto valen los conocimientos. En el caso de la propiedad intelectual, en ocasiones dar el paso es presionados por publicaciones en proceso o ya efectuadas. Esto resulta porque en la gestión de los proyectos de desarrollo en estas instituciones de I&D y universidades, se enfoca a gestionar la generación del conocimiento bajo un enfoque académico no incluyendo desde las etapas preliminares y en todo el proceso, aspectos que condicionan y determinan el valor económico del conocimiento generado (Ibarra Cisneros, M. A., Vela Reyna, J. B., y Ríos Nequis, E. I., 2020).

4.6 Tratamiento de la tecnología y del conocimiento como activos intangibles

Es importante tener en cuenta que, cuando se transfieren los resultados de la I&D a las empresas, su tratamiento tiende a ser considerado como activos o bienes intangibles. Estos deben ser reconocidos mediante procedimientos y siguiendo normativas estrictas para se considerados de esta forma. Estos intangibles relacionados con la tecnología, el Know how y los derechos de propiedad intelectual requieren de ser valorados para conocer su valor económico y por lo tanto para definir las condiciones en que se dará la transferencia y comercialización de la tecnología de manera formal. Sin embargo, para las empresas, se debe cumplir con reglas en las cuales este tipo de intangibles se incorporan de alguna forma a lo que se llama su capital intelectual.

Desde la perspectiva de las empresas, la tecnología generada en estos procesos tecnológicos adquiere dimensiones económicas trascendentes en términos de (Sullivan, P. H., 1998):

ISSN: 2992-8338

- ✓ Son base de elementos de competitividad en los mercados y de su continuidad.
- ✓ Por lo general están asociados a la tecnología aspectos de propiedad intelectual con lo cual se constituye como un verdadero patrimonio de la empresa.
- ✓ Son resultado de procesos de desarrollo altamente complejo y participativo. La innovación tecnológica no es un esfuerzo aislado y en ella se relacionan muchos actores.
- ✓ Aporta elementos de valor económico como negocios en marcha. Los inversionistas reconocen los riesgos y oportunidades de hacer negocios con empresas que garantizan generar valor a través de sus operaciones.

Por lo tanto, la tecnología debe estar sustentada en elementos de propiedad intelectual tales como patentes, secretos industriales, marcas, diseños industriales y know-how, aunado a lo que representan los signos distintivos (marcas, avisos y los nombres comerciales). Se ha demostrado que estos elementos constituyen uno de los grupos de intangibles más importantes, que controlan por una parte el saber hacer, y por la otra la imagen y prestigio de la empresa misma (Smith, G. 2002).

4.7 Prácticas y conceptos en torno a la valuación de la tecnología como intangibles

La valuación de intangibles es el procedimiento técnico y metodológico que, mediante la investigación física, económica y de mercado, permite determinar las variables cuantitativas y cualitativas que inciden en el valor de los bienes intangibles (Astudillo, M., y Mancilla, M. E., 2014).

Cuando se habla de tecnología desarrollada en los ámbitos de investigación de las ciencias aplicadas y del desarrollo tecnológico, su valuación requiere no solo de la aplicación de enfoques de valuación establecidos en las normas correspondientes, sino que es indispensable analizar todo el proceso de desarrollo desde su base de conocimiento hasta las opciones de uso comercial bajo los parámetros de desempeño que las actividades comerciales de las empresas se dan. En México se cuenta con la NORMA MEXICANA NMX-R-081-SCFI-2015 en la que se han establecido los elementos mas importantes en la valuación de intangibles, como son los tecnológicos y de propiedad intelectual.

4.7 Gestión de Riesgos y Cumplimiento

En todo el proceso es importante identificar y monitorear los posibles riesgos de varios tipos, desde los tecnológicos, hasta los financieros, políticos, institucionales, del entorno, ambientales y sociales (Wysocki, R. K., 2011). En todo momento pueden ser determinantes para la toma de decisiones de continuar, detener, reorientar, reducir, complementar, ampliar o incluso incursionar en un ámbito totalmente distinto al originalmente establecido.

5. CONCLUSIONES

En tiempos actuales la organización para la innovación requiere de visualizar no solo el impacto que tiene la generación de conocimientos y de productos académicos, sino que también es considerar, en las etapas mas tempranas posibles, los criterios que definen el valor tecnológico de los conocimientos aplicados desde el punto de vista comercial, incluyendo sus riesgos.

Los modelos de productividad de las actividades de I&D que se han reportado en la literatura, coinciden en establecer un conjunto de factores a ser considerados que incluyen el impacto de sus resultados traducidos en oportunidades tecnológicas y de ventajas competitivas para el sector productivo. Sin embargo, se propone que para mejorar la producción de resultados pertinentes para la innovación es importante gestionar el valor de uso de los conocimientos generados desde las etapas tempranas del desarrollo.

Las entidades de investigación generan productos propios de las actividades académicas, tales como artículos, prototipos, pruebas de campo, tesis incluyendo en ocasiones patentes, sin embargo, estos productos, deben ser interpretados y tratados bajo metodologías y con criterios de negocios por parte de las empresas, para ser configurados y complementados con planes de mercadotecnia, proyectos de inversión, planes de negocios, y emprendimiento, para estar en posición de ser generadores de valor.

Se recomienda considerar con especial atención aspectos de viabilidad económica, de mercado y sobre todo de propiedad intelectual no solo para proteger oportunamente los resultados del proceso, sino de sustentar sobre esta base el valor económico que debe ser evaluado y formalizado en su momento como activos intangibles tecnológicos y de propiedad intelectual.

El concepto de escala de maduración tecnológica en su esencia es una herramienta altamente confiable y recomendable aplicar, ya que significa, al ir recorriendo el proceso de maduración, gestionar el conocimiento generado y formalizándolo como intangible tecnológico y de propiedad intelectual. Sin embargo, es conveniente agregar a la gestión de los proyectos orientada mediante la escala de maduración tecnológica, la gestión en la escala de maduración de mercado y del modelo de negocio de manera simultánea.

6. REFERENCIAS

Adams, R., Bessant, J., & Phelps, R. (2006). Innovation management measurement: A review. *International journal of management reviews, 8(1)*, 21-47.

Astudillo, M., & Mancilla, M. E. (2014). La valuación de los bienes intangibles en México. *Actualidad contable FACES*, *17*(28), 5-20.

Bremser, W. G., & Barsky, N. P. (2004). Utilizing the balanced scorecard for R&D performance measurement. *R&d Management, 34(3),* 229-238.

Brown, M. G., & Svenson, R. A. (1998). RTM classic: measuring R&D productivity. *Research-Technology Management, 41(6)*, 30-35.

Busch, C., & Grimes, M. (2023). Serendipity in Entrepreneurship, Strategy, and Innovation—A Review

ISSN: 2992-8338

and Conceptualisation. *Serendipity Science: An Emerging Field and its Methods,* 69-99.

Coluccia, D., Dabić, M., Del Giudice, M., Fontana, S., & Solimene, S. (2020). R&D innovation indicator and its effects on the market. An empirical assessment from a financial perspective. *Journal of Business Research, 119*, 259-271.

Choi, M., & Lee, C. Y. (2021). Technological diversification and R&D productivity: The moderating effects of knowledge spillovers and core-technology competence. *Technovation, 104*, 102249.

Engel, D. W., Dalton, A. C., Anderson, K. K., Sivaramakrishnan, C., & Lansing, C. (2012). Development of technology readiness level (TRL) metrics and risk measures (No. PNNL-21737). *Pacific Northwest National Lab.(PNNL),* Richland, WA (United States).

Enríquez, S. F., Noriega, A. E. O., & Montijo, F. C. (2017). El capital intelectual y su valuación, como parte de los activos intangibles en la información financiera de la empresa. Trascender, contabilidad y gestión, (6), 2-10.

Gutiérrez, M. E. L., & Zavala, N. G. L. (2018). Instrumentos financieros de fomento a la Innovación: CONACYT. *Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad, 12,* 642-659.

Hasenauer, R., Gschöpf, A., & Weber, C. (2016, September). Technology readiness, market readiness and the triple bottom line: An empirical analysis of innovating startups in an incubator. In 2016 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET) (pp. 1387-1428). IEEE.

Holgersson, M., & Aaboen, L. (2019). A literature review of intellectual property management in technology transfer offices: From appropriation to utilization. *Technology in Society*, *59*, 101132.

Ibarra Cisneros, M. A., Vela Reyna, J. B., & Ríos Nequis, E. I. (2020). Capital intelectual, gestión del conocimiento y desempeño en universidades. *Investigación administrativa*, *49*(126).

Johannsen, F., Schaller, D., & Klus, M. F. (2021). Value propositions of chatbots to support innovation management processes. *Information Systems and e-Business Management, 19(1),* 205-246.

Kim, H. L., Hovav, A., & Han, J. (2020). Protecting intellectual property from insider threats: A management information security intelligence perspective. *Journal of Intellectual Capital*, *21*(2), 181-202.

Loza Vega, I., & Preciado Romero, V. A. (2020). Contribución de los activos intangibles al valor de la empresa que cotiza en la Bolsa Mexicana de Valores. *Mercados y negocios, 21(42)*, 75-92.

Melendez, K., Dávila, A., & Melgar, A. (2019). Literature review of the measurement in the innovation management. *Journal of technology management & innovation, 14(2),* 81-87.

Moussa, A. (2022). Conceptual Process Design and Technology Evaluation (TRL 3). In *Systematic Process Development: From Idea to Value via Technology Readiness Levels* (pp. 53-85). American Chemical Society.

Muñoz, L. D. C. (2020). Elementos clave de la innovación empresarial. Una revisión desde las tendencias contemporáneas. *Revista Innova ITFIP, 6(1),* 50-69.

Nandal, D. N., Kataria, D. A., & Dhingra, D. M. (2020). Measuring innovation: challenges and best practices. International *Journal of Advanced Science and Technology, 29(5),* 1275-1285.

Roberts, E. B. (2007). Managing invention and innovation. *Research-Technology Management, 50(1),* 35-54.

Secretaría de Economía (2015) *Norma Mexicana de Servicios de Valuación* (NMX-R-081-SCFI-2015)

Silberer, J., Astfalk, S., Planing, P., & Müller, P. (2023). User needs over time: the market and technology maturity model (MTMM). *Journal of Innovation and Entrepreneurship, 12(1)*, 39.

Sjödin, D., Parida, V., Jovanovic, M., & Visnjic, I. (2020). Value creation and value capture alignment in business model innovation: A process view on outcome-based business models. *Journal of Product Innovation Management, 37(2),* 158-183.

Sullivan, P. H. (1998). *Profiting from intellectual capital: Extracting value from innovation*. John Wiley & Sons.

Smith, G. (2002). Intangible Assets and Intellectual Property Accompanying Mergers and Acquisitions. Intellectual Property Assets in Mergers and Acquisitions, New York, 3-1.

Tidd, J., & Bessant, J. R. (2020). Managing innovation: integrating technological, market and organizational change. *John Wiley & Sons*.

Vega, V., Cuellar, H. F., Choque, M. R., & Sánchez, M. E. B. (2020). Innovación y éxito empresarial: algunas reflexiones teóricas. *Revista Venezolana de Gerencia: RVG, 25(91)*, 938-953.

Wysocki, R. K. (2011). Effective project management: traditional, agile, extreme. *John Wiley & Sons*.

Zulueta-Cuesta, J. C., Medina-Leon, A., & Negrin-Sosa, E. (2015). La integración del conocimiento en la transferencia tecnológica universitaria: modelo y procedimiento. *Ingeniería Industrial*, *36*(3), 306-317.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Numerical analysis of the energy absorption capacity of multi-cell square profiles under axial loads

Quirino Estrada*, Elva Reynoso*, Jesús Silva Aceves*, Lara C. Wiebe*, Manuel de Jesús Nandayapa*, Francisco Enríquez Aguilera*, Abel Quezada Carreón*, Aziel Ordoñez González*

**Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Ciudad Juárez, Chihuahua México (quirino.estrada@uacj.mx, elva.reynoso@uacj.mx, jesilva@uacj.mx, lara.wiebe@uacj.mx, mnandaya@uacj.mx, fenrique@uacj.mx, abquezad@uacj.mx, al212608@alumno.uacj.mx)*

Abstract: Frontal car crashes statistically cause a greater number of deaths, as well as a greater severity of passenger injuries. Based on the above, a numerical analysis is carried out in this article to evaluate the performance of square-based multicellular profiles subjected to axial loads. For this purpose, four structural profiles manufactured with 6063-T5 aluminum are proposed and evaluated. The analysis consisted of a compression test at 6 mm/min using the Abaqus finite element software. In all cases, the most important indicators of impact resistance such as energy absorption (Ea) and crushing force efficiency (CFE) were calculated. According to the results, the X-shaped based profile (MCX) presented the best performance of CFE equal to 0.657. Therefore, it is highly recommended for energy absorption system applications.

Keywords: Estructuras multicelulares, carga oblicua, método de elemento finito.

1. INTRODUCCIÓN

Con la llegada del concepto de resistencia al impacto (crashworthiness) en la década de los 60, el diseño estructural de los automóviles busca maximizar la capacidad de absorción de energía, así como incrementar las probabilidades de supervivencia de los ocupantes durante una colisión (Abdullah, N.A.Z. et *al.*, 2020). Los choques se clasifican según la dirección del impacto, pudiendo ser frontales, laterales, traseros y oblicuos (Ebolli, L. et *al.*, 2020). De acuerdo con (Pei, T.S. et *al.*, 2017) los choques frontales tienen un 32.3% de probabilidad de ocurrir siendo una de las condiciones de choque más predominante. Tomando en cuenta lo anterior diversos estudios se han realizado para incrementar la efectividad de los perfiles estructurales cargados de forma axial (Estrada, Q. et al., 2016); (Rogala, M. et al., 2023); (Różyło, P. et al., 2024); (Ferdynus, M. et al., 2019) . Los principales parámetros estudiados son: forma geométrica, material de fabricación y ángulo de incidencia de la carga (Yao, R. et al., 2023). Considerando perfiles multicelulares, cuya sección transversal está formada por múltiples celdas o subdivisiones, (Wang, Z. et al., 2018) realizaron un estudio numérico y experimental para definir teóricamente el mecanismo de formación de pliegues plásticos de perfiles cuadrados multicelulares. Los especímenes tuvieron base cuadrada con múltiples subdivisiones o celdas desde una celda hasta quince. Como conclusión determinaron que el modo de deformación está directamente relacionado al número de celdas. De tal forma que al aumentar el número de celdas se obtuvo una mejora en la absorción de energía (Ea). Por su parte (Xie, S. et *al.*, 2017) llevaron a cabo un análisis de resistencia al impacto de cinco perfiles multicelulares cuadrados bajo carga axial, utilizando el método de la teoría del elemento plegado super simplificado. Las estructuras evaluadas presentaron diversos elementos de unión en las esquinas. Al final del estudio determinaron la influencia de la sección transversal en los valores del valor pico (Pmax) y Ea así como la correlación con el modelo teórico propuesto. En el mismo sentido (Li, Z. et *al*., 2020) analizaron computacional y experimentalmente el comportamiento mecánico de perfiles multicelulares corrugados de base cuadrada (CCSTs). Los perfiles estudiados se obtuvieron a través de la implementación de un efecto de corrugado alrededor de la base cuadrada de un perfil multicelular (STs). De acuerdo con sus hallazgos en función de Ea demostraron la efectividad de los perfiles corrugados respectos a los (STs). (Gao, Z. et *al*., 2023) estudiaron el comportamiento de perfiles multicelulares jerárquicos al ser sometidos a trituración axial. Los resultados determinaron la efectividad de los perfiles multicelulares jerárquicos respecto a perfiles cuadrados simples hasta 2.7 veces más considerando la absorción de energía especifica. Finalmente, a partir de la revisión de la literatura, se resalta que el estudio de perfiles bajo cargas axiales es un tópico actual y de suma importancia, sin embargo, los estudios son escasamente reportados para estructuras multicelulares. Por tanto, el presente artículo propone un análisis numérico para evaluar las capacidades de resistencia al impacto de perfiles multicelulares con base cuadrada. En todos los casos las estructuras fueron fabricadas con Aluminio 6063-T5 y mantuvieron una masa de 80 gr. Para garantizar la confiabilidad de los resultados numéricos, se validó experimentalmente un modelo discreto de un ensayo a compresión de un perfil cuadrado típico.

ISSN: 2992-8338

2. PARÁMETROS DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA

El comportamiento mecánico de los perfiles multicelulares se obtuvo a partir del estudio de las curvas fuerzas vs deformación en conjunto con parámetros dimensionales y adimensionales los cuales son independientes de la geometría y material de fabricación. Los más representativos son: carga pico (Pmax), absorción de energía (Ea), fuerza promedio (Pm), absorción de la energía especifica (SEA) y eficiencia de la fuerza de aplastamiento (CFE). Se considera que CFE es óptimo cuando es igual a 1 (Tang, T. et *al* 2016). Detalles de los indicadores se muestran en la Figura 1.

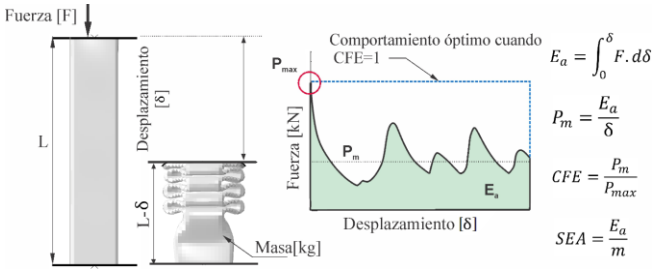


Fig. 1. Indicadores de absorción de energía con F igual a la fuerza, δ el desplazamiento y m es la masa

3. VALIDACIÓN DE UN ENSAYO DE COMPRESIÓN

Desde que el análisis del presente artículo es en forma numérica se validó experimentalmente un primer modelo discreto de un ensayo a compresión (ver Figura 2). El modelo está constituido por un perfil cuadrado 38.1 x 38.1 x 130 mm con un espesor de 1.5 mm, el cual es comprimido por dos platos rígidos. El ensayo se realizó con una máquina universal Time Group 300 kN a una velocidad de 6 mm/min. El perfil estructural se modeló con elementos S4R y propiedades elastoplásticas para el aluminio 6063-T5 con un módulo de Young de 66.94 MPa, coeficiente de Poisson de 0.33, densidad de 2700 kg/m^3 y esfuerzo de fluencia se 158.79 MPa obtenidas de (Vergara, J. et al., 2019). Efectos de endurecimiento por velocidad se descartaron, dada la insensibilidad del aluminio a este parámetro. Por su parte los platos de compresión se modelaron con elementos 3RD4. Se aplicó una condición de contacto general con un coeficiente de fricción de 0.15. A partir de un análisis de convergencia de malla se determinó un tamaño de elemento de 3 mm.

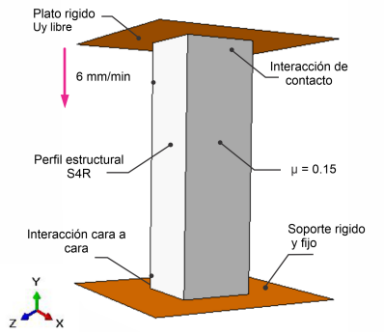


Fig. 2. Modelo discreto de un ensayo a compresión

En la Figura 3 se presenta la comparación de resultados tanto numéricos como experimentales para el comportamiento de la fuerza a lo largo del proceso de compresión. Tal y como se puede observar existe buena correlación entre modelos. En este sentido se obtuvo una carga pico (Pmax) cercana a 36 kN. Posteriormente se observa el proceso de formación de pliegues plásticos, lo cual provoca una oscilación de la fuerza de aplastamiento. Por su parte en la Figura 4 se presenta en el modo de colapso final para ambos análisis.

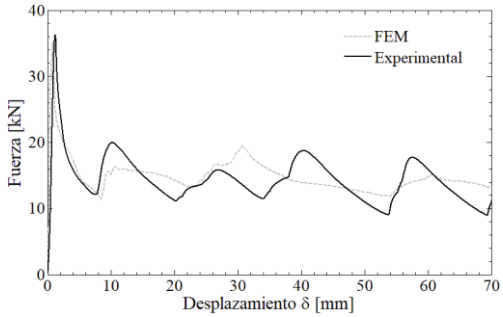


Fig. 3. Comparación de la curva fuerza vs desplazamiento

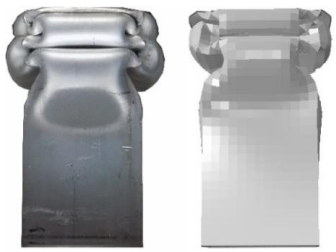


Fig. 4. Comparación del modo de deformación

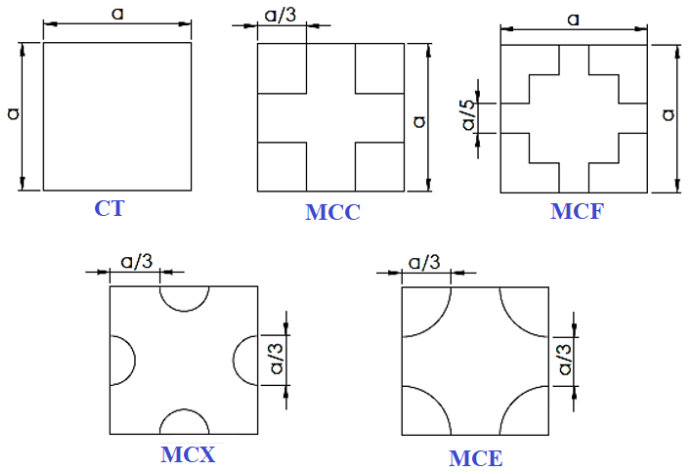
Finalmente, a partir de los análisis presentados se calcularon diferencias menores al 5% para Pmax y Ea. En este sentido, el modelo discreto queda validado, desde que, en análisis numéricos, esta diferencia está dentro de lo reportado en la literatura (Najibi, A. et al., 2021). Por tanto, es posible continuar con el análisis solo numérico de los perfiles multicelulares bajo carga axial.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO DE PERFILES MULTICELULARES CUADRADOS

El principal aporte del presente artículo es evaluar el comportamiento mecánico de perfiles multicelulares con base cuadrada cargados axialmente. Por tanto, se evaluaron cuatro configuraciones de perfiles multicelulares, al igual que un perfil cuadrado típico (CT) para fines de comparación. Los perfiles estructurales fueron manufacturados con aluminio 6063-T5 y evaluados cuasi-estaticamente a 6mm/min. La forma de la sección transversal de los perfiles multicelulares se determinó considerando un mejor desempeño de los tubos al ser reforzados en sus esquinas o puntos susceptibles al fallo. La masa de los perfiles se limitó a 80 gr. Por tanto, se realizaron ajustes en el espesor (t). Las características geométricas de los perfiles evaluados se presentan en la Tabla 1.

ISSN: 2992-8338

Tabla 1. Estructuras multicelulares, donde a igual a 38.1 mm



Código	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Masa (kg)
CT	1.50	130	0.080
MCC	0.90	130	0.080
MCF	0.83	130	0.080
MCX	0.98	130	0.080
MCE	0.98	130	0.080

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La respuesta mecánica de la fuerza de aplastamiento de los perfiles evaluados a lo largo del proceso de compresión se presenta en la Figura 5. Analizando la forma de la curva fuerza vs deformación del perfil típico CT, la implementación de celdas en los perfiles modificó considerablemente la respuesta mecánica de los perfiles multicelulares. En este sentido se observa una caída más suave y prolongada de la fuerza de aplastamiento justo después de alcanzar el valor de Pmax. En todos los casos se incrementó la capacidad de carga durante la formación de los pliegues plásticos respecto al perfil CT, lo cual es atribuido a la interacción de las paredes celulares de los tubos.

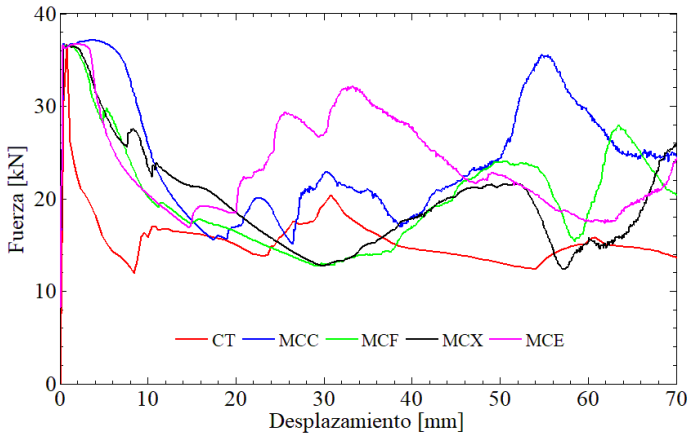


Fig. 5. Comparación de curvas esfuerzo-deformación

La absorción de energía se obtiene calculando el área bajo la curva de la Figura 5 a través del método de integración del trapecio. En la Figura 6 se presenta la Ea para los perfiles multicelulares. En todos los casos la introducción de múltiples celdas aumentó la absorción de energía de los perfile propuestos hasta en un 62.76% respecto al perfil típico cuadrado CT.

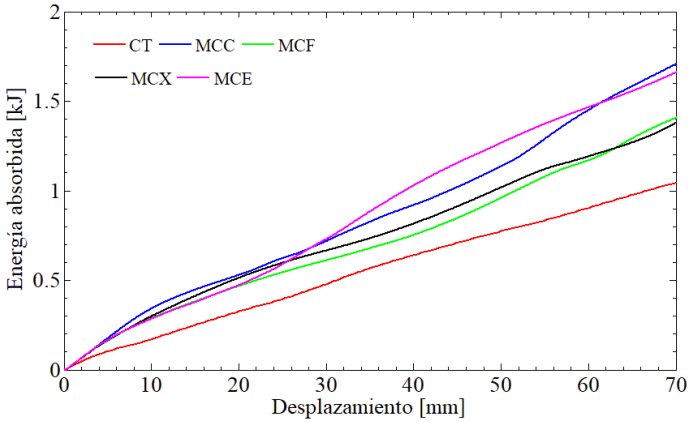


Fig. 6. Curvas energía absorbida vs desplazamiento

La absorción de energía está estrictamente definida por el modo de colapso de las estructuras. Las Figuras 7 y 8 muestran el estado de deformación final de los perfiles multicelulares incluyendo la formación de pliegues plásticos, así como líneas de bisagra estáticas y dinámicas. En este sentido se observó que el modo de colapso está influenciado por la geometría de las celdas propuestas. Por su parte las vistas de corte (a-a'), exhiben adicional a la formación de lóbulos la aparición del fenómeno de pandeo, el cual fue mayormente visible en el perfil con forma de X (MCX).

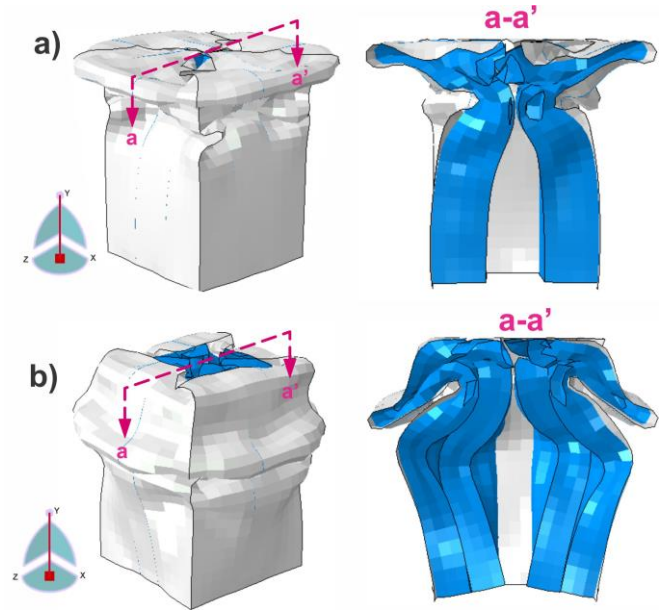


Fig. 7. Modo de colapso final de perfiles multicelulares, donde: a) perfil MCC y b) perfil MCF

ISSN: 2992-8338

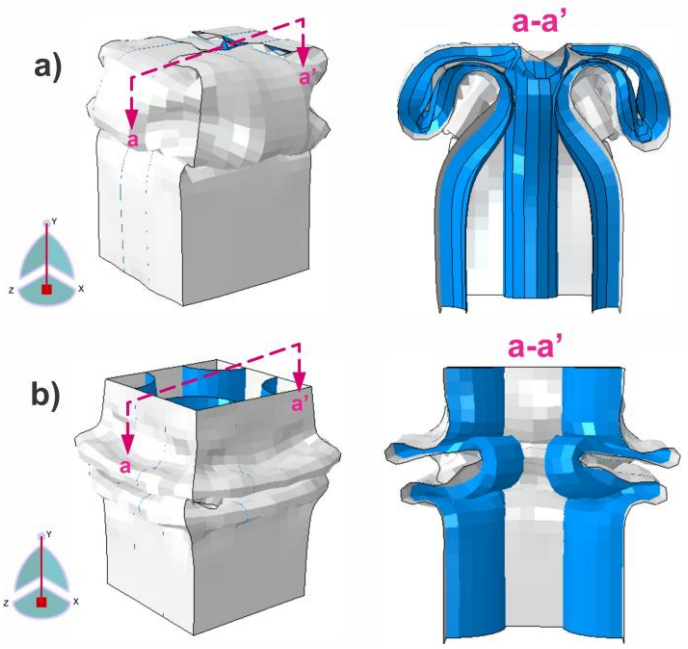


Fig. 8. Modo de colapso final de perfiles multicelulares, donde: a) perfil MCX y b) perfil MCE

La evaluación cuantitativa de los perfiles multicelulares se obtuvo a partir de los indicadores de resistencia al impacto de la Figura 1 y se presentan en la Tabla 2. Adicionalmente se muestran los resultados para el perfil típico (CT) para fines comparativos. Respecto a la máxima carga registrada (P_{max}), los perfiles multicelulares mostraron valores cercanos e incluso una disminución de este valor hasta en un 0.62% comparados con la estructura CT, lo cual es benéfico desde que en el diseño estructural es recomendable un valor bajo de $P_{max.}$ Al considerar la energía absorbida (Ea) la efectividad de los perfiles multicelulares se confirma aún más, obteniendo una mejora en todos los casos en un rango de entre el 31.42% -62.76%, lo cual es similar con lo computado para la absorción de energía especifica (SEA). La estructura más eficiente en términos de masa fue el perfil con base en forma de cruz (MCC) con un valor de 21.36 J/gr.

Tabla 2. Resumen de los indicadores de resistencia al impacto

Código	Pmax (kN)	Pm (kN)	Ea (kJ)	SEA (J/gr)	CFE
CT	36.72	15.00	1.050	13.12	0.408
MCC	37.11	24.41	1.709	21.36	0.657
MCF	36.61	20.11	1.408	17.60	0.550
MCX	36.49	19.71	1.380	17.25	0.540
MCE	36.69	23.72	1.661	20.76	0.646

Respecto al indicador CFE es definido como la eficiencia de la fuerza de aplastamiento durante el proceso de compresión. En este sentido una estructura se considera óptima cuando alcanza un valor de CFE igual a la unidad (Ferdynus, M. et *al* 2019). Físicamente significa que la fuerza de aplastamiento se mantiene constante a lo largo del proceso de comprensión. Lo anterior permitiría una mayor absorción de energía y se evitarían aceleraciones bruscas al inicio de la colisión. Considerando la Tabla 2, los perfiles multicelulares presentan un mejor desempeño de CFE respecto al perfil convencional cuadrado (CT). A partir de lo anterior se calculó una mejora en un rango de 32.35%-61.02%. Finalmente, la máxima efectividad de CFE se alcanzó con el perfil con base en forma de cruz (MCC) con un valor de 0.657. Por tanto, y considerando la insensibilidad del aluminio al endurecimiento por velocidad, este perfil es altamente recomendado para su implementación como sistemas de absorción de energía pasivos sometidos a cargas axiales por ejemplo en el diseño de cajas de colisión (crash boxes) instalados en la parte frontal de los vehículos automotrices.

6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se desarrolló un análisis numérico utilizando el método de elementos finitos para evaluar el comportamiento mecánico y absorción de energía de perfiles multicelulares de base cuadrada bajo cargas axiales. Durante el estudio se prestó especial énfasis al estudio del efecto de la sección transversal en las capacidades de Ea. A partir de lo anterior se concluye lo siguiente:

1. Considerando el perfil típico cuadrado (CT), los perfiles multicelulares son una alternativa efectiva para incrementar las capacidades de resistencia al impacto.

2. Partiendo del hecho que todos los perfiles multicelulares, así como el tubo típico (CT) tienen una masa de 80 gr. Los perfiles multicelulares permiten mantener o disminuir el valor de la fuerza pico hasta en un 0.62%.

3. La forma y geometría de las celdas de los perfiles multicelulares permitieron modificar la rigidez durante el colapso de las estructuras. En este sentido, se obtuvo un mejor desempeño de Ea con perfiles multicelulares hasta en un 62.76% para el perfil MCC.

4. Respecto a la absorción de energía especifica (SEA), el mejor desempeño de Ea por unidad de masa se obtuvo para el perfil MCC con 21.36J/gr.

5. Todas las estructuras multicelulares presentaron una mejora de CFE respecto al perfil CT en un rango del 32.35%-61.02%, siendo la más efectiva el perfil MCC con un valor de CFE de 0.657.

6. Considerando que el mejor desempeño de CFE fue para la estructura con base en forma de cruz (MCC) y atendiendo la insensibilidad del aluminio al endurecimiento por velocidad, este perfil se recomienda ampliamente para aplicaciones de sistemas de absorción de energía para colisiones axiales.

ISSN: 2992-8338

REFERENCIAS

Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. Thin-Walled Structures, 153, 106795

Eboli, L., Forciniti, C., & Mazzulla, G. (2020). Factors influencing accident severity: an analysis by road accident type. Transportation research procedia, 47, 449-456.

Estrada, Q., Szwedowicz, D., Majewski, T., Martinez, E., & Rodriguez-Mendez, A. (2016). Effect of quadrilateral discontinuity size on the energy absorption of structural steel profiles. Eksploatacja i Niezawodność, 18(2).

Ferdynus, M., Kotełko, M., & Urbaniak, M. (2019). Crashworthiness performance of thin-walled prismatic tubes with corner dents under axial impact-Numerical and experimental study. Thin-Walled Structures, 144, 106239.

Gao, Z., & Ruan, D. (2023). Axial crushing of novel hierarchical multi-cell square tubes. Engineering Structures, 286, 116141.

Li, Z., Ma, W., Hou, L., Xu, P., & Yao, S. (2020). Crashworthiness analysis of corrugations reinforced multi-cell square tubes. Thin-Walled Structures, 150, 106708.

Najibi, A., Ghazifard, P., & Alizadeh, P. (2021). Numerical crashworthiness analysis of a novel functionally graded foam-filled tube. Journal of Sandwich Structures & Materials, 23(5), 1635-1661.

Pei, T. S., Saffe, S. N. M., Rusdan, S. A., & Hamran, N. N. N. (2017). Oblique impact on crashworthiness. International Journal of Engineering Technology and Sciences, 4(2), 32-48.

Rogala, M., & Gajewski, J. (2023). Analysis of the triggering mechanism of the square thin-walled absorber. Advances in Science and Technology. Research Journal, 17(6), 206-216.

Rozylo, P., Rogala, M., & Pasnik, J. (2024). Load-Carrying Capacity of Thin-Walled Composite Columns with Rectangular Cross-Section under Axial Compression. Materials, 17(7), 1615.

Tang, T., Zhang, W., Yin, H., & Wang, H. (2016). Crushing analysis of thin-walled beams with various section geometries under lateral impact. Thin-Walled Structures, 102, 43-57.

Vergara, J. (2019). Disipación de energía por deformación plástica en estructuras de pared delgada de sección compuesta bajo cargas a flexión. Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada

Wang, Z., Liu, J., & Yao, S. (2018). On folding mechanics of multi-cell thin-walled square tubes. Composites Part B: Engineering, 132, 17-27.

Xie, S., Yang, W., Wang, N., & Li, H. (2017). Crashworthiness analysis of multi-cell square tubes under axial loads. International Journal of Mechanical Sciences, 121, 106-118.

Yao, R., Pang, T., Zhang, B., Fang, J., Li, Q., & Sun, G. (2023). On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials: State of the art and prospects. Thin-Walled Structures, 189, 110734.

ISSN: 2992-8338

Visualización de extensos conjuntos de datos espaciales con QGIS: Caso de estudio CDMX

[1,2]Odette Pliego-Martínez, [1]Alicia Martínez-Rebollar, [1]Hugo Estrada-Esquivel, [1,3]Ernesto de la Cruz-Nicolás, [1]Joaquín Pérez-Ortega

[1]Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

[2]Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Milpa Alta

[3]Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Cuautla

d21ce092@cenidet.tecnm.mx; alicia.mr@cenidet.tecnm.mx; hugo.ee@cenidet.tecnm.mx; d21ce090@cenidet.tecnm.mx; joaquin.po@cenidet.tecnm.mx

Abstract: This study focuses on the visualization of extensive datasets using open-source Geographic Information Systems, known as QGIS. The aim is to understand the complex relationships that exist between the data, which can be a challenging task with conventional tools. To illustrate this approach, Mexico City was selected as a case study. A cartographic representation was made addressing geographical and social aspects, focusing on the provision of certain services. The results revealed significant disparities in the availability of services in different areas of the city.

Keywords: Geographic Information Systems, QGIS, spatial data visualization, Mexico City.

1. INTRODUCCIÓN

Los datos espaciales, también conocimos como datos geoespaciales, son información que describen a un objeto o evento situándolo en una ubicación específica en la superficie de la tierra; donde la ubicación se muestra utilizando coordenadas geográficas y ciertas características específicas (IBM, 2024). Los datos geoespaciales abarcan una gran diversidad de información sobre el mundo físico y natural. Esto es debido a que han adquirido gran relevancia en diversos campos de aplicación; como el urbanismo, demografía, salud, medio ambiente, topografía, entre otros (Roussel, C. y Böhm, K., 2023). Aunado a los anterior, dentro del contexto de la información geoespacial, se encuentra la Big Data geoespacial. Esta se enfoca en describir extensos conjuntos espaciales masivos no estructurados o semiestructurados que son difíciles de procesar con herramientas tradicionales (Ali, T. A. T., 2022). Estos datos proporcionan una valiosa fuente de información para investigadores, permitiendo obtener una comprensión más profunda de los problemas que se están estudiando. La capacidad de analizar visualmente extensos conjuntos de datos es fundamental, ya que facilita la comprensión de la información y el descubrimiento de conocimientos significativos (Leung, C. K. et al, 2020).

La Ciencia de la Información Geoespacial se distingue por su enfoque integral en el estudio de datos espaciales. Esta área se centra en el desarrollo de métodos geodésicos e informáticos para la modelación, adquisición, gestión, exploración, análisis, visualización y evaluación de datos relacionados con fenómenos de la tierra (Bill, R. et al, 2022). Dentro de la Ciencia de la Información Geoespacial, los Sistemas de Información Geográfica desempeñan un papel fundamental; ya que estos se pueden definir como sistemas que permiten el almacenamiento, la consulta, manipulación, análisis y visualización de extensos conjuntos de datos espaciales. Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta que ofrece la posibilidad de identificar patrones y relaciones espaciales del fenómeno de estudio para la toma de decisiones. Desde un punto de vista informático, los Sistemas de Información Geográfica son herramientas computacionales que se han desarrollado para manejar extensos conjuntos de datos y se han aplicado a diferentes áreas (Sarría, F. A., 2006).

Por tal motivo, la visualización de datos emerge como una poderosa herramienta para comunicar la información de manera efectiva. La visualización de los datos es la representación gráfica de la información de datos a través de mapas, gráficas, diagramas, entre otras formas visuales (Geotig, 2024). La visualización de datos desempeña un papel fundamental en la comunicación efectiva de información, ya que puede transformar extensos conjuntos de datos y complejos en representaciones visuales comprensibles y significativas. En el contexto del análisis de datos espaciales permite identificar patrones, tendencias y relaciones geoespaciales de una manera intuitiva y accesible. Es decir, la visualización de datos espaciales ofrece una comprensión más profunda y completa de la información geográfica.

QGIS, conocido como Quantum GIS (www.qgis.org), es una herramienta SIG de código abierto diseñada para ofrecer una amplia gama de funcionalidades, desde las más simples hasta las más complejas. Estas incluyen la recopilación, almacenamiento, procesamiento, análisis, gestión y representación visual de datos geoespaciales. Lo que distingue a QGIS es su enfoque en la accesibilidad y versatilidad. Al ser un software multiplataforma, está disponible en una variedad de sistemas operativos, lo que permite a los usuarios acceder a sus funciones desde diferentes dispositivos (Baghdadi, N. et al, 2018). QGIS es una solución completa y robusta que ofrece a los usuarios la capacidad de explorar, analizar y visualizar el

ISSN: 2992-8338

mundo que la rodea de manera eficiente y efectiva; convirtiéndose en una herramienta indispensable en diversas áreas de estudio (Kim, J. et al, 2022).

Considerando los puntos mencionados anteriormente, el objetivo principal de este trabajo se enfoca en resaltar la importancia fundamental de la visualización de extensos conjuntos de datos geoespaciales utilizando la herramienta QGIS. A partir de datos cuantitativos, la visualización ofrecer una perspectiva clara y significativa para abordar desafíos complejos. Como primer análisis, representación visual permite la identificación de patrones, tendencias, áreas de interés y las relaciones espaciales entre los datos.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En esta sección, se presentan algunos estudios que han empleado Sistemas de Información Geográfica para la representación visual, destacando su aplicación y los resultados obtenidos. Por ejemplo, en la investigación de (Zhou, C. et al, 2020) con ayuda Sistemas de Información Geográfica, el uso de las tecnologías y el big data realizó una representación espacial de la enfermedad de COVID 19. En este estudio se tomó en cuenta la psicología material, la poblacional y aspectos sociales a nivel individual, grupal y regional. Se estimaron las trayectorias espaciotemporales de los pacientes, el flujo de población y se realizó la distribución espacial. Además, se realizó un análisis del equilibrio entre la oferta y la demanda de recursos médicos y diferenciación espacial de la capacidad de transporte de materiales. El trabajo (Martin, M. E. y Schuurman, N., 2020) se enfocó en la revisión y las implicaciones que tiene el Big Data en las redes sociales a través de los SIG. En esta investigación se estudió la recopilación de los datos, el análisis y la síntesis en forma cualitativa. Esto reflejó una descripción general del potencial que tiene los SIG en las ciencias de la computación, a través de las tecnologías emergentes y los métodos de análisis.

Por otro lado, el trabajo (Balla, D. et al, 2020) representó la geovisualización de bases de datos ambientales espaciales a través de diferentes técnicas. Esta visualización mostró el nivel de contaminación, la distribución espacial del suministro de agua subterránea y los cambios que se han producido tras la instalación del sistema de alcantarillado. Estas herramientas ayudaron a mejorar el conocimiento de los datos con los que trabajan los geógrafos. En el estudio (Marnasidis, S. et al, 2021) se identificaron una serie de indicadores para desarrollar mapas temáticos, relacionados con los cultivos y plantas para la polinización de las abejas. Los mapas mostraron un panorama completo de las áreas que son fuente de polen y nectar; las cuales pueden servir como guía general para el establecimiento de colmenas en áreas con alto potencial para la apicultura.

Asimismo, la investigación (Stefanov, S., 2021) desarrolló una aplicación web de un Sistema de Información Geográfica de código abierto para visualizar datos meteorológicos. La aplicación permitió visualizar datos en tiempo real de estaciones meteorológicas privadas y de datos abiertos. El trabajo (Rizwan, M., 2017) se enfocó en observar las tendencias espaciotemporales y direccionales. Se estudiaron las diferencias de distribución de las actividades urbanas a nivel de ciudad en hombres y mujeres; utilizando datos de las redes sociales basadas en la ubicación. En la investigación (Castro, J. T. y Vistan, E. F. L., 2020) se desarrolló un sistema de apoyo a la decisión que ayude a los planificadores del gobierno en la identificación de ubicaciones espaciales adecuadas de caminos rurales. El sistema permitió a los expertos organizar, monitorear y visualizar datos para que puedan ser utilizados en la planificación de la red vial.

En el trabajo de (Lemenkova, P., 2020) se presentó una aplicación de un Sistema de Información Geográfica para el seguimiento ambiental; específicamente para el monitoreo de la vegetación verde viva en los ecosistemas de una zona en regiones con duras condiciones climáticas. También, la investigación de (Ahmad, S. y Kim, D. H., 2020) realizó un análisis descriptivo y predictivo de datos relacionados con la planificación eficaz de la gestión de residuos. Este análisis visual, basado en QGIS, ayudó a asignar con precisión los contenedores de basura y predecir una ruta óptima para el camión de la basura. Esto con el objeto de que ayude a los responsables diseñar políticas más rentables.

En la investigación de (Lee, H., 2022) se estimó el caudal de agua utilizando mapas de uso de la tierra, mapas de grupos hidrológicos de suelos y mapas de estaciones pluviómetros mediante el QGIS. El objetivo fue simular los cambios en el patrón de lluvias y el uso del suelo. Este estudio permitió analizar cambios causados por factores como el cambio climático; tal es el caso de los cambios en el uso del suelo, la urbanización y el patrón de precipitaciones. El estudio de (Mostarac, K. et al, 2021) se centró en investigar las ventajas y desventajas de los criterios regulatorios para la organización de la red postal con ayuda de la herramienta QGIS. Este estudio permitió hacer un análisis a profundidad del modelo de organización; ya que la red postal es un conjunto integral de varios subconjuntos compuesto por la infraestructura, las redes y los recursos humanos. Por último, en el trabajo de (Debnath, P., 2022) se realizó el análisis de la red de carreteras utilizando QGIS. En este estudio se recopilaron los mapas de densidad de carreteras mayores y menores. También se obtuvo la ruta más corta entre dos puntos de la red. Este análisis fue con la finalidad de ser considerado como un instrumento esencial para la planificación del transporte.

En la revisión de la literatura, se examinaron diversos estudios que han empleado Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la visualización de extensos conjuntos datos. Estos trabajos destacan la importancia de como la visualización de los datos, a través de los SIG, ayudan a la interpretación y análisis de datos complejos; demostrando cómo estas herramientas facilitan la comprensión de patrones y relaciones geoespaciales. La revisión de estos estudios subraya la relevancia de la visualización de datos mediante SIG, reafirmando su utilidad en diversos campos de investigación.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA VISUALIZACIÓN DE DATOS ESPACIALES UTILIZANDO QGIS

La metodología propuesta para la visualización de extensos conjuntos de datos utilizando QGIS está fundamentada en el trabajo de (Fry, B., 2008); la cual está centrada en la

ISSN: 2992-8338

visualización de datos. La metodología se compone de 3 pasos principales: adquisición de los datos, el preprocesamiento de los datos y la representación visual de los datos. Se optó por emplear el software QGIS versión 3.34.1 para la representación cartográfica. A continuación, se presenta a detalle cada uno de los pasos principales de la metodología.

3.1. Adquisición de los datos

En el contexto de este estudio, se optó por delimitar el área geográfica de interés en la Ciudad de México. Esta metrópoli se destaca como un centro financiero, cultural, político y económico tanto a nivel nacional como internacional, además de ser reconocida por su rica diversidad cultural e histórica. La variada composición espacial de la Ciudad de México ofrece un entorno idóneo para investigar una amplia gama de fenómenos, como educación, salud, transporte, entre otros (Data México, 2024). Asimismo, la disponibilidad de datos geoespaciales y socioeconómicos son un factor relevante, ya que facilita el acceso a información precisa y actualizada, permitiendo llevar a cabo análisis significativos y pertinentes. La complejidad y la extensión de la Ciudad de México, junto con la diversidad de variables a considerar en cualquier análisis, hacen que la cantidad de datos generados y disponibles sea considerable, lo que justifica considerar a la Ciudad de México como extensos conjuntos de datos.

Para la realización de esta investigación se recurrió a diferentes fuentes oficiales de la Ciudad de México que proporcionan datos geoespaciales. La Tabla 1 muestra una descripción de la información obtenida. Como primer paso de la metodología se procedió a la extracción y selección de los atributos de interés, los cuales son fundamentales para el análisis que se llevará a cabo.

Tabla 1. Descripción de la información recopilada

Datos	Formato	Fuente
Alcaldías Localidades Manzanas	Shape Shape Shape	Portal Datos abiertos, (Gobierno de la Ciudad de México, 2024)
Escuelas	csv	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (INEGI, 2024)
Localidades: Datos socioeconómicos	csv	Índice de marginación, (CONAPO, 2024)

3.2. Preprocesamiento de los datos

Los datos recolectados fueron sometidos a diversos procesos para garantizar su calidad y coherencia. Esto incluyó la eliminación de datos redundantes utilizando la función drop_duplicates en Python. La corrección de valores erróneos y la consistencia de unidades se llevaron a cabo manualmente. La consistencia de unidades aseguró que todas las variables estuvieran expresadas en la misma escala de medida. Para abordar los datos faltantes, se aplicó la interpolación de vecindad espacial y cálculo del promedio de una zona geográfica. Esto implicó identificar observaciones geográficamente cercanas y calcular un promedio de los valores conocidos en esas áreas

3.3. Representación visual de los datos

Una vez que los datos estuvieron preparados para el análisis. El propósito principal fue profundizar en la comprensión de los datos mediante su representación visual. Es importante destacar que la visualización desempeña un papel fundamental en este proceso, ya que permite un primer análisis para identificar patrones, tendencias y relaciones que podrían no ser evidentes al analizar simplemente los datos en formato tabular o numérico. La representación visual facilita la detección rápida de anomalías, la comparación entre diferentes conjuntos de datos, la identificación de áreas de interés, entre otros. En este sentido, QGIS permitió explorar de manera visual los datos geoespaciales; gracias a su robustez y flexibilidad, fue posible desentrañar las complejidades inherentes a estos conjuntos de datos y descubrir información significativa que, de otro modo, podría pasar desapercibida. A continuación, se presenta la representación cartográfica obtenida y su análisis de diversos casos, destacando las principales conclusiones derivadas de este proceso de exploración visual.

La representación cartográfica de la división territorial de la Ciudad de México revela una estructura compleja y detallada. Según la información cuantitativa, la Ciudad de México se divide en 16 alcaldías, con 1,814 localidades y un total de 74,020 manzanas, definidas como conjuntos de viviendas, distribuidas en cada localidad. La información plasmada en un mapa proporciona una perspectiva profunda y cuantitativa de la distribución demográfica de la población en la ciudad. Se destaca una concentración significativa de población tanto en el norte como en el centro de la ciudad; mientras que se observa una notable escasez de población en el sur, véase Figura 1.

Acorde a la información geoespacial obtenida, en la Figura 2, se puede observar la distribución geográfica de las escuelas en la Ciudad de México, clasificadas según su nivel educativo: especial, preescolar, primaria, secundaria, medio superior y superior. El mapa revela patrones significativos en la ubicación de estas instituciones educativas en toda la extensión urbana. Por ejemplo, se observa que las escuelas de nivel superior tienden a concentrarse principalmente en áreas cercanas al centro de la ciudad. Como un primer análisis, se podría plantear que la distribución de las escuelas de nivel superior presenta desafíos de accesibilidad para la población que reside en las localidades periféricas. Este análisis, respaldado por datos cuantitativos, subraya la importancia de abordar las disparidades en el acceso a la educación superior; lo que podría contribuir significativamente a una toma de decisiones más informada.

Desde una perspectiva social, se consideró la variable relacionada con la población que cuenta con un nivel de educación básica; la cual contempla preescolar, primaria y secundaria. También se tomó en cuenta la variable relacionada con la población sin acceso a energía eléctrica. Ambas variables forman parte de los indicadores que componen el índice de marginación. Esta información se presenta en términos de porcentajes a través de un mapa de coropletas, como se muestra en la Figura 3-4. Al analizar visualmente el mapa, en ambos casos se observa una variabilidad significativa en la distribución de la población en el acceso a los servicios.

ISSN: 2992-8338

Específicamente se destaca que el porcentaje de la población con educación básica y sin acceso a la energía eléctrica aumenta en las localidades que se encuentran en la periferia de la ciudad. Esta representación visual ofrece una perspectiva clara y reveladora de la variabilidad en la distribución de la población con acceso a diversos servicios a lo largo de las diferentes localidades de la ciudad.

Finalmente, se presenta un análisis que fusiona los datos del índice de marginación por localidad con la distribución geográfica de escuelas de nivel medio superior (Figura 5). El índice de marginación proporciona una visión integral de las condiciones socioeconómicas en diferentes áreas; ya que abarca diversas variables sociales, demográficas y económicas para medir las carencias. La información mostrada en el mapa, respaldada por los datos cuantificas, revelan una tendencia de la concentración de un mayor número de escuelas en zonas menos marginadas. Por ejemplo, las zonas marginadas se encuentran al sur de la ciudad y es ahí donde existen menos cantidad de escuelas. Este análisis muestra como las condiciones de la localidad está relacionado con el acceso a los servicios.

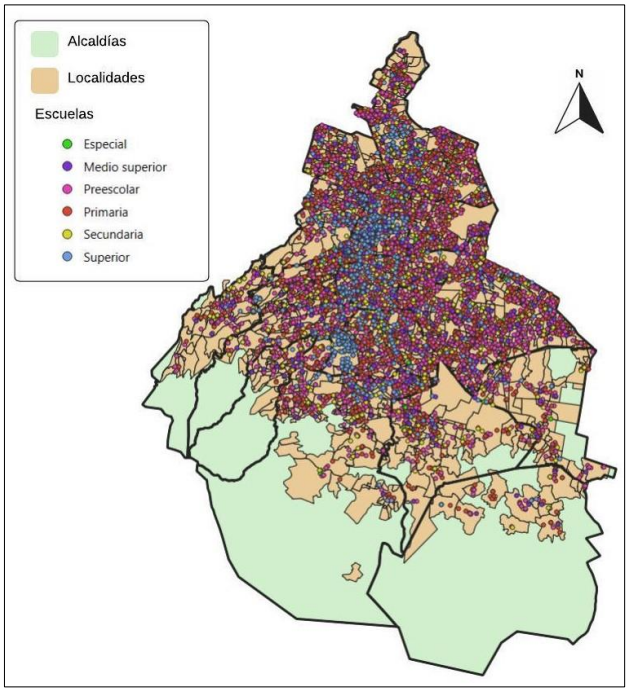


Figura 2. Distribución escuelas de la Ciudad de México

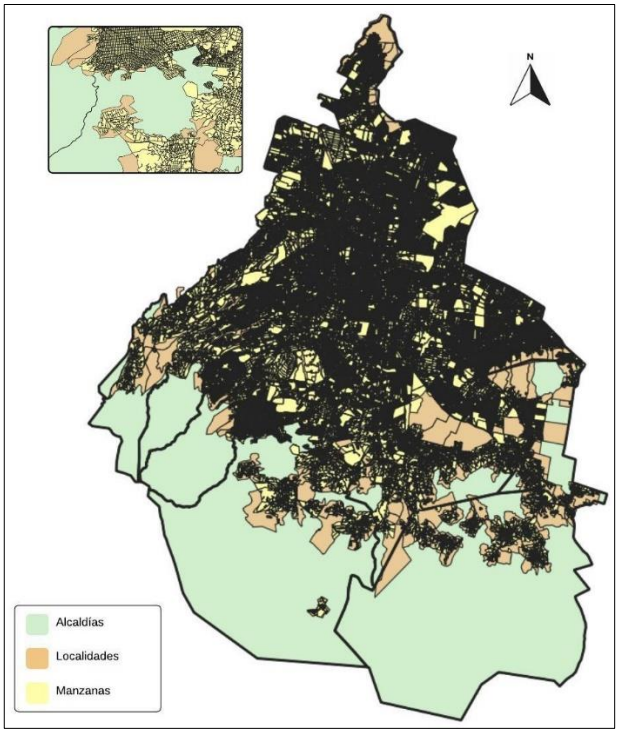


Figura 1. División territorial de la Ciudad de México.

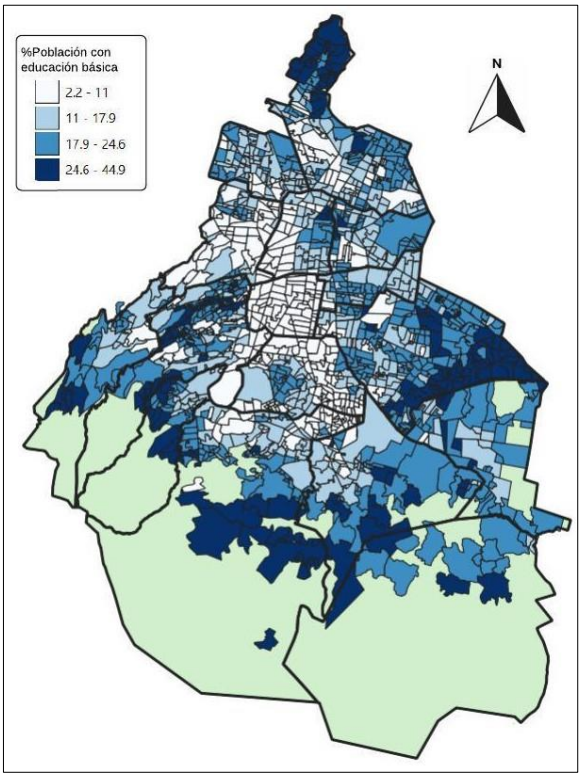


Figura 3. Población con acceso a la educación básica.

ISSN: 2992-8338

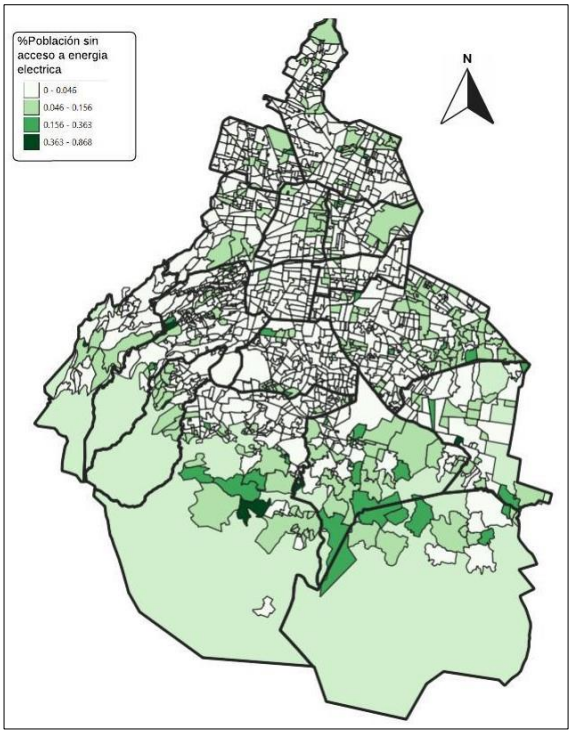


Figura 4. Población sin acceso a energía eléctrica

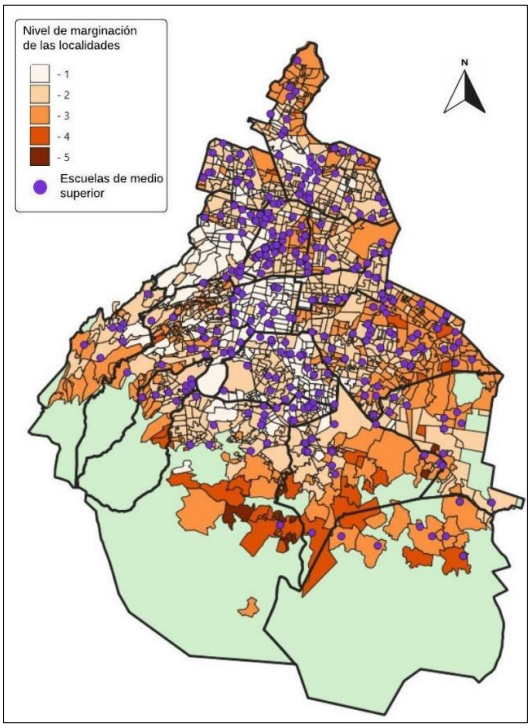


Figura 5. Distribución de las escuelas de medio superior con base en los niveles de marginación.

4. RESULTADOS

Los resultados de la investigación, potenciados por la visualización de datos a través del software QGIS, han revelado una serie de patrones significativos para el caso de estudio en cuestión. La representación cartográfica ha posibilitado una comprensión más profunda al permitir la identificación de tendencias espaciales de manera clara y efectiva. La capacidad de visualizar extensos conjuntos de datos con QGIS ha sido fundamental para este análisis. Esta visualización no solo ha mejorado la interpretación de los resultados, sino que también ha facilitado la comunicación de hallazgos, destacando así la importancia crítica de la visualización en la investigación geoespacial.

En relación con la distribución geográfica de las instituciones educativas en la Ciudad de México, se identificó que las escuelas de nivel superior tienden a concentrarse en áreas cercanas al centro de la ciudad, lo que puede plantear desafíos de accesibilidad para los residentes de las localidades periféricas. Esta concentración de instituciones de educación superior en el centro podría dificultar el acceso a la educación superior para aquellos que viven en las zonas más alejadas, lo que destaca la importancia de considerar la equidad en el acceso a la educación en la planificación urbana y educativa.

Con respecto a la disponibilidad de los servicios, se observó una variabilidad considerable que refleja la disparidad social existente en la Ciudad de México. Esta disparidad se hace evidente al analizar la distribución de servicios básicos y las condiciones socioeconómicas de las localidades. Dicha disparidad tiene un impacto directo en el acceso equitativo a oportunidades y servicios para diferentes segmentos de la población. Al presentar los datos de manera clara y comprensible, se facilita la toma de decisiones. Por ejemplo, resalta la necesidad de políticas y acciones dirigidas a reducir estas brechas y promover la igualdad de oportunidades para todos los ciudadanos.

5. CONCLUSIONES

La visualización de datos mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS ha sido fundamental para comprender y comunicar los hallazgos obtenidos de manera efectiva, permitiendo la creación de mapas que destacan las tendencias espaciales y facilitan la interpretación de los resultados. El análisis exhaustivo de los datos geoespaciales relacionados con la distribución educativa en la Ciudad de México ha proporcionado una visión profunda de las disparidades educativas y sociales. Este enfoque impacta directamente en la toma de decisiones al permitir a los expertos identificar áreas críticas y a los responsables formular estrategias basadas en evidencia sólida. Por ejemplo, el diseño de políticas y programas más efectivos.

Como trabajos futuros, se plantea la exploración y análisis de nuevas variables que puedan ayudar a entender mejor el fenómeno de estudio. Se considera fundamental incorporar datos adicionales relacionados con la geografía urbana y examinar otras variables geográficas y sociales relevantes.

Para llevar a cabo este análisis, se planea utilizar técnicas avanzadas de análisis estadístico geoespacial, que permitan

ISSN: 2992-8338

identificar patrones espaciales y relaciones entre las variables de interés. Además, se pretende emplear técnicas robustas como clustering espacial, que agrupa áreas geográficas similares en función de sus características educativas y sociales.

REFERENCIAS

Sarría, F. A. (2006). Sistemas de información geográfica. *Universidad de Murcia*, 239.

Fry, B. (2008). *Visualizing data*. O'Reilly, United States of America.

Baghdadi, N., Mallet, C. y Zribi, M. (2018). QGIS and generic tools, *Wiley,* 1.

Castro, J. T. y Vistan, E. F. L. (2020). A geographic information system for rural accessibility: database development and the application of multi-criteria evaluation for road network planning in rural areas. *Springer International Publishing,* 277-288.

Balla, D., Zichar, M., Tóth, R., Kiss, E., Karancsi, G. y Mester, T. (2020). Geovisualization techniques of spatial environmental data using different visualization tools, *Applied Sciences*, 10, 6701. 277-288.

Lemenkova, P. (2020). Hyperspectral vegetation indices calculated by Qgis using Landsat Tm image: a case study of Northern Iceland, *Advanced Research in Life Sciences*, 4, 70-78.

Ahmad, S. y Kim, D. H. (2020). Quantum GIS based descriptive and predictive data analysis for effective planning of waste management, *IEEE, Access*, 8, 46193-46205.

Leung, C. K., Chen, Y., Hoi, C. S., Shang, S., Wen, Y. y Cuzzocrea, A. (2020). Big data visualization and visual analytics of COVID-19 data, *24th International* Conference Information Visualisation, 4, 415-420.

Zhou, C., Su, F., Pei, T., Zhang, A., Du, Y., Luo, B. y Xiao, H. (2020). COVID-19: challenges to GIS with big data, *Geography and sustainability*, 1, 77-87.

Martin, M. E. y Schuurman, N. (2020). Social media big data acquisition and analysis for qualitative GIScience: Challenges and opportunities, *Annals of the American Association of Geographers*. 110, 1335-1352.

Rizwan, M., Wan, W. y Gwiazdzinski, L. (2020). Visualization, spatiotemporal patterns, and directional analysis of urban activities using geolocation data extracted from LBSN, *International Journal of Geo-Information*, 9, 137.

Mostarac, K., Kavran, Z. y Bešenić, V. (2021). Application of geographic information system for the postal network analysis, *Perner's Contacts*, 16.

Stefanov, S. (2021). Visualization of Meteorological Data Sets With Open Source GIS, *International Journal of Computer Trends and Technology*, 69, 15-17.

Marnasidis, S., Kantartzis, A., Malesios, C., Hatjina, F., Arabatzis, G. y Verikouki, E. (2021). Mapping priority areas for apiculture development with the use of geographical information systems, *Agriculture*, 11, 182.

Kim, J., Kim, D. H., Lee, J., Cheon, Y. y Yoo, S. (2022). A scoping review of qualitative geographic information systems in studies addressing health issues, *Social Science & Medicine*, 314, 115472.

Bill, R., Blankenbach, J., Breunig, M., Haunert, J. H., Heipke, C., Herle, S. y Werner, M. (2022). Geospatial information research: state of the art, case studies and future perspectives. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 90, 349-389.

Debnath, P. (2022). A QGIS-Based Road Network Analysis for Sustainable Road Network Infrastructure: An Application to the Cachar District in Assam, India, *Infrastructures*, 7, 114.

Ali, T. A. T. (2022). Geospatial big data analytics applications trends, challenges & opportunities, *Asian Basic and Applied Research Journal*, 140-144.

Lee, H., Chae, M. S., Park, J. Y., Lim, K. J. y Park, Y. S. (2022). Development and application of a QGIS-based model to estimate monthly streamflow, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11, 40.

Roussel, C. y Böhm, K. (2023). Geospatial xai: A review, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12, 355.

Geotig (2024). Espacio, https://blogs.upm.es/espacio-geotig/sig/analisisvisualizacion-datos/ 2024.

IBM (2024). ¿Qué son los datos geoespaciales?, https://www.ibm.com/mx-es/topics/geospatial-data 2024

Gobierno de México (2024), *Data México*, https://www.economia.gob.mx/datamexico/

Goberrno de la Ciudad de México (2024). *Portal de Datos abiertos de la Ciudad de México*, https://datos.cdmx.gob.mx/group/division-geografica

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI (2024). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE)*, https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx

Consejo Nacional de Población, (2024). *Índice de marginación*, https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372

ISSN: 2992-8338

The exercise of sovereignty with the use of Distributed Ledger Technologies.

Vladimir Orihuela Hernández*. Dr. Javier Ortiz Hernández**

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CP 62493 México (Tel: 777-216-8370; e-mail: d23ce172@cenidet.tecnm.mx).*

***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, CP 62493 México (Tel: 777-130-4582; e-mail: javier.oh@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: The decentralization of information through the massive adoption of information and communications technologies has accelerated the globalization process. This document addresses the characteristics and adoption of Distributed Ledger Technologies (DLT) by governments as a trustworthy tool to reinforce the exercise of sovereignty due to characteristics such as transparency, immutability and the ability to verify transactions as well as in the registration of information in a decentralized manner based on consensus.

Keywords: DLT, blockchain, government, sovereignty, distributed ledger, trust.

1. INTRODUCCION

Nuestra identidad en lo individual o colectivo está relacionada al entorno cultural, social, geográfico y de circunstancias en las que como individuos nacemos y nos desarrollamos. La identidad puede ser concebida como un fenómeno que se forma y se desarrolla en el contexto de la interacción social, donde los individuos intercambian ideas, discuten y llegan a acuerdos mediante el dialogo racional y la deliberación pública [1]. En ese ese contexto, las naciones del mundo son Estados-Nación a partir de las identidades individuales o colectivas de las sociedades y pueblos que los conforman, donde el Estado-Gobierno en una plena democracia es quien los representa.

A nivel global las sociedades están viviendo una transformación partir el desarrollo, uso y disponibilidad de las tecnologías de la información y comunicaciones, prácticamente los pueblos en el mundo se han convertido en sociedades digitales o sus generaciones van inevitablemente en camino a serlo. En México la disponibilidad y uso de tecnologías de la información en los hogares ha crecido de manera importante [2]

La adopción masiva de las tecnologías de la información a partir del desarrollo de internet como medio de comunicación de masas rompió en su momento muchos paradigmas de las comunicaciones, uno de ellos es la descentralización de la información. En el ejercicio de la soberanía por parte de gobiernos que se asumen democráticos esta adopción debe ser abordada a nivel del individuo quien es quien decide como, cuando y con quien interactuar.

En ese sentido, este articulo sugiere la implementación de las Tecnologías de Libro mayor Distribuido (DLT) en los gobiernos debido a la capacidad de estas tecnologías de democratizar y transparentar los procesos de la administración pública dando confianza al ejercicio de la gobernanza y la ejecución de las políticas públicas.

1.1 Distributed Ledger Technologies (DLT)

Los componentes tecnológicos de las DLT son las *bases de datos distribuidas* sincronizadas a partir de *protocolos de consenso* y que hacen uso de *algoritmos hash y criptografía asimétrica* para el registro y/o acceso a la información, lo cual nos garantiza la integridad de la información y el no repudio (Fig. 1).

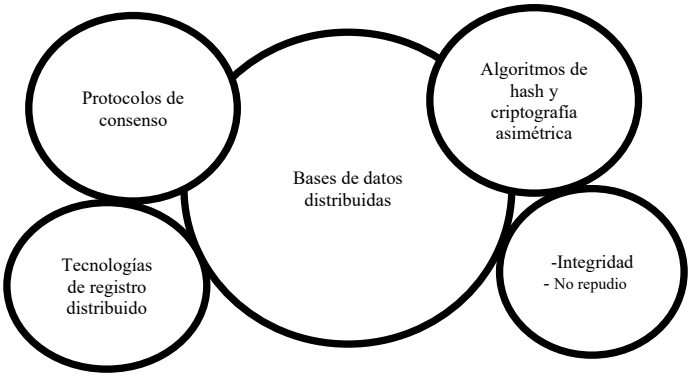


Fig. 1. Las DLT y sus componentes [3]

1.2 Protocolos de consenso

El consenso en una DLT se refiere al proceso de lograr un acuerdo entre los participantes en cuanto al estado correcto de los datos en el sistema. El consenso lleva a que todos los nodos compartan exactamente los mismos datos de manera sincronizada. Un algoritmo de consenso, por lo tanto, hace dos cosas: asegura que los datos en el libro mayor sean los

ISSN: 2992-8338

mismos para todos los nodos de la red y, a su vez, evita que actores malintencionados manipulen los datos, ver tabla 1.

Algoritmo	Funcionamiento
Prueba de trabajo (PoW)	Los nodos resuelven un problema matemático computacional para crear nuevos bloques. Se usa para Bitcoin
Prueba de participación (PoS)	Los nodos participan en la validación de las transacciones. Se usa en la red Ethereum 2.0
Prueba de autoridad. (PoA)	Requieren la aprobación de la mayoría de los nodos "autoridades" para que un bloque sea creado. Se usa en Hyperledger

Tabla 1. Algunos algoritmos de consenso

1.3 *Blockchain*

De los tipos de DLT que han cobrado mayor relevancia son las denominadas blockchain las cuales se caracterizan por su estructura de bloques relacionados en los que se registran transacciones de manera cronológica o lineal haciendo uso para cada transacción de funciones criptográficas y criptografía asimétrica para la autentificación. (Fig. 2)

El desarrollo generado a partir de la propuesta de emisión de "una versión puramente electrónica del dinero que permitiera transferir de manera confiable valor entre entes sin una autoridad financiera de por medio" [5], abrió el espectro de aplicaciones financieras descentralizadas a partir del valor dado a una representación digital de activos, en este caso bajo el nombre de bitcoin.

Aun cuando a este desarrollo lo sucedieron muchas implementaciones de blockchain, la aparición de la red Ethereum marca un hito importante ya que su desarrollo permite la programación de contratos inteligentes abriendo con esto un amplio espectro de posibles aplicaciones [6].

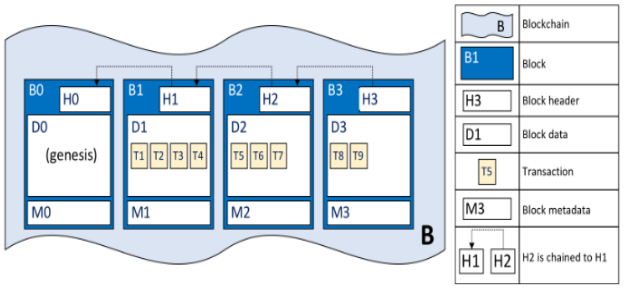


Fig. 2. DLT-blockchain. [4]

1.4 *Contratos inteligentes*.

Los contratos inteligentes proporcionan el lenguaje de las transacciones que permiten modificar el estado de la DLT, pueden facilitar el intercambio y la transferencia de cualquier cosa de valor como acciones, dinero, contenido, propiedad o servicios entre partes involucradas en una transacción [7].

1.5 *Tipos de implementación de las DLT*.

Son dos los tipos de implementación de tecnologías de libro mayor distribuido:

- Las de tipo permisionadas. Son aquellas en las que los participantes están debidamente autentificados y autorizados para participar en la red.
- Las de tipo no permisionadas. Son las que no requieren de ningún tipo de autorización para participar, es decir, cualquiera puede unirse a la red, así como escribir y leer transacciones. Bajo este esquema se desconocen los actores del sistema, lo que significa que podría haber algunos actores maliciosos.

1.6 Carteras digitales (Wallets)

Las carteras digitales son el acceso a los bienes digitales, estas pueden ser desde un dispositivo electrónico hasta una aplicación web o móvil, nos permiten interactuar, hacer transacciones o registros dentro de una DLT específica. Existe una variedad muy amplia de carteras digitales para DLT e independientemente de con cual se trabaje todas incorporan mecanismos de seguridad para su interacción mediante el uso de criptografía asimétrica, a través del uso de claves públicas y privadas entre los usuarios lo cual garantiza la seguridad y anonimato en el registro de las transacciones en la DLT según sea el caso [8].

2. Relación soberanía-ciudadano con las DLT

Los ciudadanos bajo un sistema de gobierno democrático ejercen su soberanía a través del Estado a partir de un marco legal que permite su participación en la construcción y desarrollo del Estado-Nación al que pertenecen. En ese sentido, la información de la identidad se convierte en el bien intangible más preciado del ciudadano ya que le permite la interacción en distintos campos.

Con la gestión de la información de la identidad mediante las DLT, los gobiernos tienen la oportunidad de poner en manos de los ciudadanos herramientas de interacción a partir del consenso entre las partes. El hecho de poder registrar información de manera segura, inmutable, consensada y sincronizada a partir de una red descentralizada de computadoras o nodos participantes que utilizan el internet como medio de comunicación abre un amplio espectro de casos de estudio para su aplicación en el sector público [9]

Al ser la información de la identidad del individuo el punto central para toda posible interacción, la implementación de las DLT en los gobiernos requiere de un tipo de implementación permisionada, es decir, que los participantes se encuentren plenamente identificados en la red a través de mecanismos de criptografía asimétrica lo cual en gran medida asegura la privacidad y seguridad de los datos, pero sobre todo genera confianza ya que se conocen de manera plena las partes involucradas en la interacción, abonando con esto a la soberanía del individuo quien decide bajo mecanismos de autenticación como interactuar con otros individuos o con instituciones de tipo públicas o privadas.

2.1 Transparencia y acceso a la información pública en los gobiernos

Las políticas públicas en su ejecución enfrentan fenómenos como el de la corrupción que genera desconfianza en el

ISSN: 2992-8338

ejercicio de la administración pública, en los procesos legislativos, en los procesos de impartición de la justicia, así como en los mecanismos de participación ciudadana.

La implementación de mecanismos como portales en internet dedicados a la transparencia son cada vez más comunes en los gobiernos. En México es una obligación la disposición de la información pública a partir de una normatividad de datos abiertos. [10]

El acceso a la información pública empodera a los ciudadanos, les permite conocer detalles sobre políticas, acciones gubernamentales, presupuestos y otros datos relevantes de sus gobiernos, lo cual los fortalece por que genera confianza en el manejo de los recursos públicos.

2.3 *Las DLT en los gobiernos*

La implementación de las DLT en los gobiernos podría devolver la confianza en los mismos derivado del registro de la información de manera cronológica, distribuida, inmutable y verificable a partir de un consenso entre los participantes lo que la hace transparente, es decir, un participante que busca modificar la información de un determinado registro, requiere de la aprobación del total de los participantes para poder hacerlo, pero además, ésta información no puede ser cambiada atrás en el tiempo sino que se registra de manera cronológica, por lo que los registros subsecuentes complementan la información ya almacenada. En este punto el desarrollo de los contratos inteligentes como encargados de modificar el estado del libro mayor son un punto medular para el diseño de los distintos casos de aplicación en los gobiernos. Por ello las DLT en los gobiernos pueden romper muchos paradigmas con respecto a la interacción ciudadano-gobierno.

3. Casos de estudio

3.1. Gestión de la identidad, elecciones soberanas, democracia participativa.

El uso de las blockchain para el registro de la identidad por sus bondades aporta elementos de seguridad para la interacción en las relaciones persona - persona, persona – institución donde los datos de la identidad son el bien intangible más preciado para el individuo.

El registro de la información de la identidad de las personas con las DLT cuenta con implementaciones a gran escala, uno de ellos es Estonia, nación pionera en el desarrollo de su propia blockchain escalable la cual sirve como medio de interacción con sus ciudadanos para los procesos de la administración pública y participación ciudadana [11].

La Comisión Europea ha puesto en marcha su proyecto EBSI (European Blockchain Services Infraestructure) que pone a disposición de los países que conforman la Unión Europea una infraestructura de blockchain para el desarrollo de servicios gubernamentales con base en la validación de la identidad del individuo bajo el concepto de identidad auto soberana (SSI) [12] con el desarrollo de distintos casos de aplicación para el sector público a partir de carteras digitales para la gestión de la información poniendo en el centro la soberana decisión del ciudadano sobre su interacción.

3.2 Finanzas soberanas

El gobierno de China ha implementado como parte de su política económica la emisión del yuan digital basado en DLT, reconoce en esta tecnología ventajas como la reducción del alto costo de la emisión y circulación de papel moneda, la transparencia de las transacciones económicas, la reducción del lavado de dinero y la evasión de impuestos, respalda el desarrollo económico y social mediante el concepto de finanzas inclusivas; con el yuan digital china busca construir una infraestructura financiera que le permita ser más eficiente en sus sistemas de pagos [13].

Con base a esta argumentación el desarrollo del peso digital en México con base en las DLT como moneda soberana no sería una ocurrencia, por el contrario, daría viabilidad a un sistema de finanzas descentralizadas basado en la confianza y en la transparencia de las transacciones.

3.3 Soberanía alimentaria

El concepto de soberanía alimentaria hace defensa del derecho de los pueblos a definir sus políticas agrícolas y alimentarias sin necesidad de factores externos que comprometan la seguridad alimentaria de la población.

La implementación de las DLT en el sector agroalimentario puede tener un gran impacto debido a la capacidad de rastrear el origen y el proceso de producción de los alimentos de manera transparente y verificable lo cual es fundamental para garantizar la calidad de los productos. Empresas transnacionales se encuentran explorando la implementación en estas tecnologías para dar un valor agregado de autenticidad a sus productos partiendo de la posibilidad de rastrear de manera particular su origen por parte de sus consumidores [14].

En ese sentido, una implementación de las DLT en el sector agroalimentario puede fortalecer la soberanía alimentaria en México, ya que además de garantizar la interacción directa entre consumidor - productor eliminando intermediarios y generando precios justos, se tiene la capacidad de hacer una traza y certificación sobre el origen de los alimentos que se consumen, es decir desde su siembra, desarrollo, transporte, distribución hasta el consumidor final.

Aun mas allá bajo este esquema se podría incluso pensar en una soberanía alimentaria de barrio, en el que personas de una comunidad que cuenten con sembradíos de traspatio puedan intercambiar los productos que ellos mismos han cosechado de manera confiable, esto por supuesto tendría que estar soportado por un marco legal solido por parte del Estado Mexicano.

4. Conclusiones.

La implementación de las DLT como herramienta de confianza para el registro de información de manera inmutable, transparente, verificable y distribuida a partir del

ISSN: 2992-8338

consenso de los participantes ha roto el paradigma de la descentralización de los gobiernos.

Ante el fenómeno de la globalización al que los países hacen frente ya sea a través de políticas públicas o de leyes que defienden el mercado interno, la implementación de una capa de registro distribuido con base en las DLT de tipo permisionada en nuestro país de manera oficial y sobre la cual sea posible la implementación de contratos inteligentes para la representación de bienes, contenido, servicios o propiedad entre partes marcaria un hito en el concepto de soberanía desde el terreno de lo digital.

REFERENCIAS

[1] Habermas. Teoría de la acción comunicativa
[2] INEGI (2022). Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/programas/dutih/2022/
[3] DLT R. Aldeco https://youtu.be/bW3Ondc8bQM?si=D9HlNZ-0VrxnMc5p&t=2054
[4] Hyperledger. https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/release-2.5/ledger/ledger.html#blockchain
[5] Nakamoto Satoshi (2008). https://bitcoin.org/files/bitcoin-paper/bitcoin_es_latam.pdf
[6] Butrerin Vutelin (2015), https://ethereum.org/es/whitepaper/
[7] Hyperledger Schwentker (productor)(2017), ¿What is blockchain technology?[hyperledger], Hyperledger, EU de https://bit.ly/3v4V5jG
[8] Rojo, M. I. (2019). Blockchain: fundamentos de la cadena de bloques. Ediciones de la U. https://elibro.net/es/lc/itzacatepec/titulos/127086
[9] The Linux Foundation (2020) Case Studies, EU, Hyperledger https://www.hyperledger.org/learn/case-studies
[10] DOF (2016), Diario Oficial de la Federación, Ley Federal de Transparencia
[11] Estonia Kotka, T., Laanemets, K., & Pettai, I. (2017). "Building a Digital Society: E-Residency in Estonia." Government Information Quarterly, 34(4), 597-602. [DOI: 10.1016/j.giq.2017.09.002]
[12] EU - European Comission - EBSI, (2023) https://ec.europa.eu/digital-building-blocks/sites/display/EBSI/What+is+ebsi
[13] Zheng, L. (20 de enero de 2016), El banco central se esfuerza por el lanzamiento temprano de la moneda digital, Agencia de Noticias Xinhua, Recuperado de: http://www.gov.cn/xinwen/2016-01/20/content_5034823.htm
[14] https://www.hyperledger.org/case-studies/walmart-case-study

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Ponderación de variables causales de congestión de tráfico utilizando el método de entropía

Ernesto De la cruz-Nicolás[1, 2], Hugo Estrada-Esquivel[1], Alicia Martínez-Rebollar[1], Odette Alejandra Pliego-Martínez[1, 3], Rosa Olivia Maquinay-Díaz[1]

[1]Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
[2]Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Cuautla
[3]Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Milpa Alta

(d21ce090@cenidet.tecnm.mx, hugo.ee@cenidet.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx, d21ce092@cenidet.tecnm.mx, olivia.md@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: The weighting of causal variables in traffic congestion is crucial for understanding the complexity and interaction of the variables that contribute to congestion in road networks. This research article reveals how entropy can provide a quantitative measure of uncertainty and variability in the variables associated with traffic congestion. Entropy analysis techniques allow for the examination of the dispersion and distribution of data in a set of traffic variables and road incidents. This study highlights the importance of using entropy as an analytical tool to understand the dynamics of the variables causing traffic congestion.
Keywords: Congestion, Traffic, Entropy, Uncertainty, Variability.

1. INTRODUCCIÓN

La congestión del tráfico representa un desafío persistente y multifacético en las redes de transporte urbano, afectando la eficiencia, la sostenibilidad y la calidad de vida en las ciudades de todo el mundo (Mondragón, 2020). A medida que las ciudades continúan con su crecimiento demográfico y económico, la movilidad de la sociedad incrementa y su gestión efectiva se vuelve crucial para garantizar la accesibilidad para los ciudadanos (Bibri, 2021). Sin embargo, la identificación y ponderación de las variables que contribuyen a la congestión del tráfico es una tarea compleja, dada la interacción dinámica y no lineal entre una variedad de variables relacionadas con el tráfico.

En este contexto, el análisis de la entropía emerge como una herramienta poderosa para analizar las variables causales de la congestión del tráfico. La entropía mide la incertidumbre o la variabilidad en un sistema, proporcionando una medida cuantitativa de la dispersión y la distribución de datos (Gu et al., 2020). Al aplicar técnicas de análisis de entropía a conjuntos de datos relacionados con el tráfico, podemos identificar las variables y sus interacciones entre las variables clave que influyen en la congestión de tráfico.

En este artículo, se explora el uso de la entropía como una herramienta analítica para asignar un peso a las variables causales de la congestión del tráfico. Esto se aplica a un conjunto de variables relacionadas con el tráfico e incidencias viales, obtenidas mediante la aplicación de mapas denominada Here Maps de la Ciudad de México. El análisis de entropía permite revelar la variabilidad o dispersión de cada variable, realizando una evaluación de su nivel de incertidumbre y asignando un peso que permita ordenarlas en función de su impacto, lo que permite proyectar cuantitativamente el grado de influencia de cada variable en la congestión del tráfico.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En el ámbito de la gestión de la congestión del tráfico, varios estudios han explorado estrategias y técnicas para identificar y comprender las variables que influyen en el origen de la congestión de tráfico. La revisión del estado del arte permitió identificar estudios que destacan la importancia de la ponderación de variables de un conjunto de variables propuesto de tráfico e incidencias viales, para analizar las variables de mayor impacto en el origen de la congestión del tráfico.

En el estudio realizado por (Jiang et al., 2024), se presenta un método de análisis jerárquico que aborda varios aspectos clave de la congestión del tráfico. Este método comprende el cálculo de la capacidad de carga de las carreteras utilizando datos geoespaciales, la extracción de información sobre la demanda de tráfico en tiempo real y el análisis detallado de las relaciones entre el tráfico regional, las variables de impacto y la heterogeneidad espacial.

La propuesta de (Wang et al., 2019) se enfoca en proporcionar un nuevo diagrama para la visualización efectiva de la escala espacio-temporal de los flujos de tráfico de origen-destino, específicamente a partir de las trayectorias de taxis. Este enfoque se basa en la relación entre diversas variables relevantes, como las horas pico de la mañana y por la tarde, el volumen y la dirección del tráfico, la demanda de viajes, la intensidad, así como el tiempo y la distancia en días laborales y fines de semana. El análisis realizado permite una comprensión profunda de los patrones de movilidad urbana y facilita el análisis de las complejas interacciones entre las

ISSN: 2992-8338

diferentes variables que influyen en los flujos de tráfico. El análisis de la influencia del número de intersecciones de las calles que ocasionan cambios en el flujo de tráfico es identificado en el trabajo de (Zhao et al., 2022), donde se determinó que las calles influyen entre sí espacialmente a partir de sus intersecciones.

El trabajo de (Yang et al., 2021) propone un enfoque dinámico de modelado de causalidad espacio-temporal para analizar las relaciones causales del tráfico en la red vial a gran escala. Para lo anterior utilizan el algoritmo de entropía de transferencia para detectar la causalidad. En su investigación encuentran la relación de las estructuras de las calles con una causalidad al tráfico, el tiempo, segmentos de carretera e intersecciones de calles.

La teoría del flujo de tráfico se utiliza en el trabajo de (Pi et al., 2021) para identificar el aumento de vehículos como la causa de la congestión del tráfico. Esto se logra extrayendo datos del flujos de vehículos de datos de tráfico mediante GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para detectar las curvas acumulativas de conteo de vehículos e identificar las áreas de congestión del tráfico.

Los factores sociodemográficos y económicos analizados por (Dadashova et al., 2021) identifican que el promedio mensual de tráfico diario, el número de empleados, la tasa de disponibilidad de alquileres, los permisos de construcción, el índice de precios del combustible y el índice de condiciones económicas causan la congestión de tráfico.

El estudio realizado por (Yue et al., 2022) se centra en la predicción de la causa raíz de la congestión de tráfico. Para ello, emplea un modelo de Markov que permite capturar la correlación espacio-temporal de la congestión entre varios segmentos de calle e intersecciones de manera simultánea. Este enfoque permite identificar de manera precisa la causa raíz crítica de la congestión. La incidencia se destaca como la principal causa de la congestión de tráfico, tal como se trata en el trabajo de (Cao et al., 2021), en donde utiliza un método de inferencia causal para identificar el impacto de la incidencia en la velocidad y su efecto causal en la duración en horas de dicha incidencia.

El trabajo de (Koźlak & Wach, 2018) identifica la aplicación efectiva de los instrumentos de política de transporte como una variable crucial para contribuir en la reducción de la congestión del tráfico. Al implementar estrategias bien diseñadas y coordinadas, como la regulación de horarios de trabajo flexibles, el fomento del transporte compartido o la inversión en infraestructuras que prioricen el transporte público y los medios no motorizados, se puede lograr una reducción significativa en la congestión.

La concentración de ingresos y empleo en zonas geográficas son variables que se han identificado como un factor que contribuye a una mayor congestión del tráfico, de acuerdo al trabajo de (Rahman et al., 2022). Este hallazgo fue obtenido mediante el uso de un Modelo de Ecuaciones Estructurales, el cual analizó un conjunto de variables relevantes.

La aportación de (Silva et al., 2018) explica las complejas asociaciones del flujo de tráfico basándose en un marco teórico-empírico que utiliza un conjunto de variables de confusión como las condiciones meteorológicas, ubicación geográfica entre otras. En el estudio de (Ewing et al., 2018), se aborda el concepto de compacidad, el cual se refiere a la medida de proximidad o agrupamiento de elementos dentro de un espacio específico. Se explora cómo esta compacidad interactúa con la congestión de tráfico, investigando si existe una relación positiva o negativa entre ambos aspectos.

De acuerdo a (Sun et al., 2021) las carreras escolares es una variable que causa la congestión de tráfico, en su investigación encontraron que las carreras escolares aumentan la probabilidad de congestión vial en 4,5 puntos porcentuales. El impacto es mayor por la mañana que por la tarde. Además, la congestión del tráfico es grave cerca de las escuelas que son grandes, públicas que privadas, en barrios caros o sin alojamiento para estudiantes.

La visualización de manera gráfica de las causas de la congestión del tráfico y cuantificar su importancia el trabajo de (Dong et al., 2024) lo realiza utilizando el método SHAP y proponen un sistema de análisis visual interactivo que permite la exploración multinivel de las condiciones de la calle.

Los estudios revisados han contribuido a identificar las variables causales de la congestión del tráfico. En este trabajo, nuestra propuesta consiste en asignar un peso a cada una de estas variables a partir de su valor de incertidumbre para determinar su contribución específica a la congestión del tráfico a partir de un conjunto de variables propuesto.

3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE ENTROPÍA DE LAS VARIABLES CAUSALES DE LA CONGESTIÓN DE TRÁFICO

La metodología para el análisis de entropía de las variables causales de la congestión de tráfico se divide en siete fases concretas y secuenciales. En la primera fase, se identifica el caso de estudio específico que servirá como base para nuestro análisis. La segunda fase implica la recolección de datos, abarcando información sobre el tráfico e incidencias viales. La tercera fase se centra en la descripción detallada de las variables consideradas como causales en la congestión del tráfico. La cuarta fase se dedica al preprocesamiento de los datos, con el objetivo de prepararlos para su análisis posterior. En la quinta fase, se calcula la entropía de las variables causales, obteniendo así el valor de incertidumbre asociado a cada una. La sexta fase consiste en analizar la entropía de estas variables, evaluando su impacto en la congestión del tráfico. Finalmente, en la séptima fase, se valida la ponderación de las variables mediante un algoritmo predictivo, identificando así las variables influyentes en la congestión de tráfico.

2.1 Identificación del caso de estudio

El caso de estudio son las 16 alcaldías de la Ciudad de México debido a que la ciudad se encuentra entre las congestionadas del mundo, según el informe de movilidad proporcionado por INRIX Traffic 2023. La elección de estas 16 alcaldías permite obtener una representación integral de las diversas áreas urbanas y patrones de tráfico dentro de la ciudad, lo que facilita un análisis detallado y completo de las variables que contribuyen a la congestión del tráfico en grandes ciudades.

ISSN: 2992-8338

2.2 Recolección de datos

La recolección de datos de tráfico e incidencias viales se llevó a cabo de manera continua en intervalos de 5 minutos durante las 24 horas del día en el período comprendido entre enero y febrero de 2024. La recolección de datos estuvo centrada en los datos de tráfico e incidencias viales de la Ciudad de México. Para la recolección de datos se siguió la metodología propuesta por el trabajo de (De la Cruz-Nicolás et al., 2024). En la tabla 1 se presenta las dimensiones del conjunto de datos formado.

Tabla 1. Descripción que detalla el número de registros y la cantidad de variables del conjunto de datos de tráfico e incidencias viales.

Conjunto de datos	Registros	Número de variables
Tráfico-Incidencias	1,000, 000	26

2.3 Descripción de variables

La descripción de variables causales de la congestión de tráfico ha sido abordada en la literatura, donde se han identificado numerosas variables significativas y causales. En la tabla 2 se define una propuesta de las variables causales de la congestión de tráfico tratados en esta investigación.

Tabla 2. Conjunto de variables causales de la congestión de tráfico.

Conjunto de datos	Variable	Descripción
Tráfico	jamFactor	Índica el nivel de congestión de tráfico existente en una escala de 0 a 10, donde 10 es una congestión alta.
	Bbox_Traffic	Cuadro delimitador donde se origina el tráfico.
	Free_Flow	Sin tráfico.
	Length	Longitud de la calle.
	Number_Segments	Número de segmentos que contiene la calle.
	Speed	La velocidad esperada.
	Speed_Uncapped	Velocidad sin restricción.
	Daily_Traffic	Día en que se monitorea el tráfico.
	Day_Off_Traffic	Valor de 1 cuando el día es festivo y 0 cuando no lo es.
	Traffic_Hour	Hora del monitoreo de tráfico.
	Traffic_Minute	Minuto del monitoreo de tráfico.
	Traffic_Day_Number	Número de día del monitoreo de tráfico (1= lunes, 2=martes…7=domingo).
	Work_Day_Traffic	Monitoreo del tráfico en semana laboral y fin de semana (semana laboral=1, fin de semana=0).
Incidencias	Bbox_Incident	Cuadro delimitador donde se origina la incidencia.
	Road_Closed	Indica si la calle está cerrada por la incidencia (0 abierto y 1 cerrado).
	Criticality	Representa la gravedad del incidente. Tiene los siguientes valores: bajo - menos severo, menor, importante y crítico.
	Type	Describe el tipo de incidente: accidente, construcción, congestión, avería de vehículo, clima entre otros.
	Incident_Day	Día del monitoreo de la incidencia (valores entre 1 y 30, 1 y 31 según el mes).
	Day_Off_Incident	Valor de 1 cuando el día es festivo y 0 cuando no lo es del monitoreo de la incidencia.
	Incident_Hour	Hora del monitoreo de la incidencia.
	Incident_Month	Mes del monitoreo de la incidencia.
	Incident_Minute	Minuto del monitoreo de la incidencia.
	Incident_Day_Number	Número de día del monitoreo de incidencia (1= lunes, 2=martes…7=domingo).
	Work_Day_Incident	Monitoreo de la incidencia en semana laboral y fin de semana (semana laboral=1, fin de semana=0).
	Category_Number	Categoría de la incidencia.
	Time	Formato de 24 horas a minutos.

El conjunto de datos de Tráfico-Incidencias incluye una variable crucial denominada 'jamFactor'. Esta variable se destaca como la variable clase, donde los registros se clasifican en tres niveles de congestión de tráfico: verde para indicar ausencia de congestión, amarillo para representar congestión moderada y rojo para señalar congestión alta.

2.4 Preprocesamiento de los datos

El preprocesamiento involucró la transformación y estandarización de datos con el objetivo de incrementar la calidad y la idoneidad del conjunto de datos de Tráfico-Incidencias. Este proceso de preprocesamiento se llevó a cabo en dos pasos que se describen a continuación.

Paso 1. Transformación de datos: La transformación aplicada incluyó la implementación de la transformación de raíz cuadrada, la transformada cúbica y el z-score, utilizando las ecuaciones 1 y 2 de (Rojas-Jimenez, 2022), la ecuación 3 de (Curtis et al., 2016) respectivamente en el conjunto de datos de Tráfico-Incidencias, con el fin de normalizar los datos.

$$Variable\ normalizada = \sqrt{Variable\ original} \quad (1)$$

$$Variable\ normalizada = \sqrt[3]{Variable\ original} \quad (2)$$

$$z = \frac{(x-\mu)}{\sigma} \quad (3)$$

Dónde:

x Es el valor individual de la variable.
μ Es la media de la distribución de la variable.
σ Es la desviación estándar de la distribución de la variable.

Los resultados de la normalización del conjunto de datos de Tráfico-Incidencias indicaron que al aplicar la transformada cúbica se mejora de manera notable la normalidad de dicho conjunto.

Paso 2. Estandarización: Para el conjunto de datos de Tráfico-Incidencias, que contiene variables en diferentes escalas, se llevó a cabo una estandarización que ajusta los valores dentro de un rango entre 0 y 1. La estandarización se realizó mediante la ecuación número 4 (Guisande et al., 2013).

$$x_{norm} = \frac{(x-x\_min)}{x_{max}-x\_min} \quad (4)$$

Dónde:
x Es el valor original que se desea normalizar.
x_min Es el valor mínimo en el conjunto de datos original.
x_max Es el valor máximo en el conjunto de datos original.
La estandarización resultó en que todas las variables del conjunto de datos de Tráfico-Incidencias quedaran en un rango entre 0 y 1.

2.5 Cálculo de la entropía de las variables causales de la congestión de tráfico

El cálculo de la entropía de las variables causales de la congestión de tráfico permite evaluar la incertidumbre y la variabilidad de cada variable del conjunto de variables propuesto. El cálculo se centró en determinar la entropía de cada variable para identificar las variables de mayor impacto en el origen de la congestión de tráfico utilizando la ecuación número 5 (Olimpia, 2020).

$$H(X) = -\sum_{x\in X} P(x)\ log_2\ P(X) \quad (5)$$

Dónde:
X Es la variable aleatoria.

ISSN: 2992-8338

Los valores de entropía de las variables obtenidas con la ecuación 5 se ordenaron de menor a mayor, ya que aquellos con menor valor poseen una menor incertidumbre y contribuyen de manera significativa al modelo (Christopher et al., 2008), tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Valores ordenados de entropía de cada variable que causa la congestión de tráfico.

Número	Variable	Valor de entropía
1	Road_Closed	0
2	Day_Off_Traffic	0.50188384
3	Day_Off_Incident	0.50188384
4	Criticality	0.72930232
5	Work_Day_Traffic	0.91758918
6	Work_Day_Incident	0.91781269
7	Incident_Month	0.91825872
8	Category_Number	1.16102762
9	Number_Segments	1.49113744
10	Type	2.18833606
11	Traffic_Day_Number	2.7257448
12	Incident_Day_Number	2.72574834
13	Daily_Traffic	3.16991705
14	Incident_Day	3.16992026
15	Traffic_Minute	3.58377537
16	Incident_Minute	3.58383797
17	Incident_Hour	4.20317612
18	Traffic_Hour	4.42943189
19	Free_Flow	5.46871293
20	Bbox_Traffic	5.76946977
21	Bbox_Incident	5.76946977
22	Speed	5.87462317
23	Speed_Uncapped	6.03088299
24	Time	7.98038035
25	Length	9.61173521

Las variables que tienen un umbral de valor de entropía menor a 3 establecido en este trabajo de investigación, se consideran de mayor impacto en la generación de congestión de tráfico son: **Road_Closed, Day_Off_Traffic, Day_Off_Incident, Criticality, Work_Day_Traffic, Work_Day_Incident, Incident_Month, Category_Number, Number_Segments, Type, Traffic_Day_Number e Incident_Day_Number.** Estas variables se destacan como las variables de mayor impacto que causan la congestión de tráfico en el conjunto de datos analizado.

2.6 Análisis de la entropía de las variables causales de la congestión de tráfico

El análisis de los valores de entropía de cada variable, como se detalla en la sección 2.5, se basa en la información presentada en la tabla 3. Al considerar las variables vinculadas a la congestión del tráfico, se interpreta la entropía de la siguiente manera:

Las variables **"Road_Closed", "Day_Off_Traffic" y "Day_Off_Incident"** tienen valores de entropía cercanos a cero, lo que indica que hay muy poca incertidumbre o variabilidad en estos datos. Esto sugiere que estas variables son bastante predecibles debido a que poseen un intervalo no incierto de valores y consistentes en el conjunto de datos.

Las variables **"Length" y "Time"** tienen los valores de entropía altos, lo que sugiere una gran variabilidad en estos datos. Esto podría indicar que hay una amplia gama de longitudes de carreteras en la ciudad de México y tiempos de incidencia variables dependiendo donde ocurran, lo que contribuye a una mayor incertidumbre.

Las variables relacionadas con el tiempo, como **"Incident_Hour", "Traffic_Hour", "Incident_Minute" y "Traffic_Minute",** tienen valores de entropía relativamente altos. Esto sugiere que hay una variabilidad significativa en los datos de tiempo, lo que podría ser atribuible a patrones de tráfico e incidencias que varían según la hora y el minuto del día.

2.7 Validación de la ponderación de las variables

La validación de la ponderación de las variables causales con menor entropía, que se presentan en la tabla 3 y están relacionadas con la congestión de tráfico, se llevó a cabo utilizando un conjunto de datos de movilidad vehicular compuesto por 23,859 registros, previamente equilibrados mediante la técnica de SMOTE (Técnica de Sobremuestreo Sintético para la Minimización de la Clase Minoritaria). Además, se identificaron 12 variables de mayor influencia en el origen del tráfico, detalladas en la tabla 3: **Road_Closed, Day_Off_Traffic, Day_Off_Incident, Criticality, Work_Day_Traffic, Work_Day_Incident, Incident_Month, Category_Number, Number_Segments, Type, Traffic_Day_Number e Incident_Day_Number**. Estas variables se utilizaron como entrada en un algoritmo de Random Forest implementado en Python, donde la variable JamFactor se empleó como variable de clase. Los hiperparámetros utilizados en el algoritmo fueron los siguientes:

- n_estimators: 200 que se refiere al número de árboles en el bosque
- max_features: sqrt
- max_depth:20 de profundidad
- min_samples_split: 5
- min_samples_leaf: 5
- bootstrap: True

Se dividió el conjunto de datos en un 80% para entrenar el algoritmo y un 20% para la prueba. Al ejecutar el algoritmo de Random Forest, se logró una precisión (del inglés, Accuracy) del 72% en la predicción de la congestión de tráfico. Además, se presenta la matriz de confusión en la Figura 1 para visualizar el rendimiento del algoritmo Random Forest en la predicción de los estados de congestión de tráfico. Esta predicción se basa en las primeras 12 variables de mayor influencia, clasificadas por el valor de entropía de cada variable.

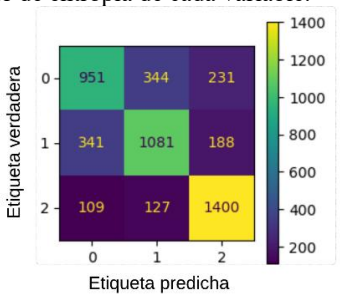


Figura 1. Matriz de confusión en la predicción de los estados de congestión de tráfico.

Los resultados obtenidos muestran el rendimiento del modelo de clasificación de Random Forest, en un conjunto de datos con tres clases: "Amarillo", "Rojo" y "Verde". La precisión, que indica la proporción de predicciones correctas para cada clase, varía entre 0.68 y 0.77, lo que significa que el modelo tiene un rendimiento aceptable en la identificación precisa de

ISSN: 2992-8338

cada clase. El índice de recuperación (del inglés, recall), que mide la capacidad del modelo para identificar correctamente los casos positivos, oscila entre 0.62 y 0.86, siendo alto para la clase "Verde". El índice F1 (del inglés, F1-score), que combina precisión y el índice de recuperación en una única métrica, también muestra valores razonables entre 0.65 y 0.81 para las tres clases. Esto indica que el modelo tiene una buena combinación de precisión y capacidad de identificación de casos positivos para todas las clases. La precisión general del modelo es del 72%, lo que significa que el 72% de las predicciones del modelo son correctas en general.
Los resultados muestran que el modelo tiene un rendimiento sólido en la clasificación de las tres clases, con cierta variabilidad en la precisión y el índice de recuperación entre las clases, pero en general muestra una buena capacidad de identificación de casos positivos y negativos, como se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resumen de métricas de evaluación del modelo de clasificación del Random Forest con el conjunto de datos de Movilidad vehicular.

Color	Precisión	Índice de recuperación	Índice F1
Amarillo	0.68	0.62	0.65
Rojo	0.70	0.67	0.68
Verde	0.77	0.86	0.81

El algoritmo logró una precisión del 72% en la predicción de congestión de tráfico, un resultado notable considerando que solo se empleó la mitad del total de variables disponibles. Este enfoque permitió ponderar cada variable según su valor de entropía, ofreciendo así una forma de ordenarlas o clasificarlas según su nivel de incertidumbre. Este enfoque ofrece una valiosa perspectiva sobre la contribución relativa de cada variable al proceso de predicción, lo que puede resultar crucial para la toma de decisiones informadas y la optimización de futuros modelos de predicción de congestión de tráfico.

4. RESULTADOS

Se realiza un análisis exhaustivo de las variables que influyen en la congestión de tráfico, centrándose en su ponderación utilizando el método de entropía. Este enfoque se sustenta en la premisa de que las variables que contribuyen significativamente a la congestión del tráfico exhibirán una menor entropía.

Los resultados obtenidos muestran cómo este enfoque puede proporcionar una visión profunda de las variables que contribuyen a la congestión del tráfico. Esta contribución de las variables está ordenada de acuerdo a su valor de incertidumbre, lo que cuantitativamente proyecta un conjunto de variables causales de la congestión de tráfico, identificando cuáles son las que influyen de manera descendente. Al ponderar las variables de acuerdo al valor de influencia en la congestión de tráfico, se abre la posibilidad de seleccionar un número determinado de ellas como entrada para cualquier algoritmo predictivo. La elección del número de variables dependerá de la precisión deseada en las predicciones, considerando el costo computacional asociado.

Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para la planificación y gestión del tráfico, ya que proporcionan información valiosa sobre qué variables son relevantes para abordar en estrategias de mitigación de la congestión. Al identificar y priorizar las variables influyentes de manera cuantitativa, los responsables de la toma de decisiones pueden desarrollar políticas y medidas efectivas para mejorar la fluidez del tráfico, reducir los tiempos de viaje y minimizar los impactos negativos de la congestión en la calidad de vida de los ciudadanos y la economía en general.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La ponderación de variables causales de congestión de tráfico mediante el método de entropía se revela como una técnica eficaz para asignar un peso escalado a un conjunto de variables, permitiendo así identificar las variables influyentes en el fenómeno de la congestión del tráfico. Esta identificación se realiza de manera ascendente, basada en los valores de entropía de las variables, donde aquellas con menor entropía se consideran influyentes.

La utilización de la entropía como medida de incertidumbre ha resaltado la importancia de considerar la variabilidad y la imprevisibilidad de las variables relacionadas con el tráfico, proporcionando una comprensión profunda de las variables que contribuyen a la congestión de tráfico. Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para la gestión del tráfico, ya que ofrecen información clave para desarrollar estrategias de mitigación de la congestión efectivas y mejorar la eficiencia de los modelos predictivos de congestión de tráfico.

En el ámbito de investigaciones futuras, resulta imperativo ampliar el conjunto de datos incorporando variables adicionales que aborden diversos aspectos relevantes para comprender la congestión del tráfico. Entre estas variables, se incluyen aquellas relacionadas con la parte socioeconómica, la cultura de manejo, los niveles de estrés de los usuarios y los reglamentos de movilidad vehicular, así como también las dimensiones de la infraestructura vial. A pesar de que el aumento en la dimensionalidad del conjunto de datos puede plantear desafíos, esta diversificación es esencial para capturar la diversidad de variables que inciden en la congestión del tráfico, lo que, a su vez, permitirá una aproximación completa a las variables que ejercen mayor influencia.

Además, resultaría enriquecedor llevar a cabo un análisis exhaustivo de las 26 variables propuestas en este estudio. Este análisis podría incluir la evaluación de la correlación de Spearman, dado que los datos no exhiben normalidad, así como la aplicación de técnicas adicionales como el Análisis de Componentes Principales y el Modelo de Ecuaciones Estructurales. La implementación de estas técnicas posibilitaría la comparación del grado de influencia de cada variable entre las distintas metodologías, proporcionando una comprensión robusta y completa de la relación entre las variables y la congestión del tráfico.

REFERENCES

Mondragón, A. R. (2020). Determinación de patrones de evolución de la congestión vial usando técnicas de minería

ISSN: 2992-8338

de datos espacial. *UD y la geomática*, (15) ,5-15. https://doi.org/10.14483/23448407.15250.

Bibri, S. E. (2021). Data-driven smart sustainable cities of the future: An evidence synthesis approach to a comprehensive state-of-the-art literature review. *Sustainable Futures*, (3), 100047. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2021.100047.

Gu, H., Yu, Z., Li, G., Luo, J., Ju, Q., Huang, Y., & Fu, X. (2020). Entropy-based research on precipitation variability in the source region of China's Yellow River. *Water*, 12(9), 2486. https://doi.org/10.3390/w12092486.

Jiang, D., Zhao, W., Wang, Y., & Wan, B. (2024). A spatiotemporal hierarchical analysis method for urban traffic congestion optimization based on calculation of road carrying capacity in spatial grids. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(2), 59. https://doi.org/10.3390/ijgi13020059.

Wang, H., Huang, H., Ni, X., & Zeng, W. (2019). Revealing spatial-temporal characteristics and patterns of urban travel: A large-scale analysis and visualization study with taxi GPS data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(6), 257. https://doi.org/10.3390/ijgi8060257.

Zhao, Y., Han, X., & Xu, X. (2022). Traffic flow prediction model based on the combination of improved gated recurrent unit and graph convolutional network. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 804454. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.804454.

Yang, S., Ning, L., Cai, X., & Liu, M. (2021). Dynamic spatiotemporal causality analysis for network traffic flow based on transfer entropy and sliding window approach. *Journal of Advanced Transportation*, 2021(1), 1–17. https://doi.org/10.1155/2021/6616800.

Pi, M., Yeon, H., Son, H., & Jang, Y. (2021). Visual Cause Analytics for Traffic Congestion. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(3), 2186–2201. https://doi.org/10.1109/tvcg.2019.2940580.

Dadashova, B., Li, X., Turner, S., & Koeneman, P. (2021). Multivariate time series analysis of traffic congestion measures in urban areas as they relate to socioeconomic indicators. *Socio-Economic Planning Sciences*, (75), 100877. https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100877.

Yue, W., Li, C., Chen, Y., Duan, P., & Mao, G. (2022). What is the root cause of congestion in urban traffic networks: Road infrastructure or signal control?. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 8662–8679. https://doi.org/10.1109/tits.2021.3085021.

Cao, D., Wu, J., Dong, X., Sun, H., Qu, X., & Yang, Z. (2021). Quantification of the impact of traffic incidents on speed reduction: A causal inference based approach. *Accident; Analysis and Prevention*, (157), 106163. https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106163.

Koźlak, A., & Wach, D. (2018). Causes of traffic congestion in urban areas. *Case of Poland. SHS Web of Conferences*, (57), 01019. https://doi.org/10.1051/shsconf/20185701019.

Rahman, M. M., Najaf, P., Fields, M. G., & Thill, J.-C. (2022). Traffic congestion and its urban scale factors: Empirical evidence from American urban areas. *International Journal of Sustainable Transportation*, 16(5), 406–421. https://doi.org/10.1080/15568318.2021.1885085.

Silva, C., d'Orey, P. M., & Aguiar, A. (2018). Interpreting traffic congestion using fundamental diagrams and probabilistic graphical modeling. *IEEE International Conference on Data Mining Workshops,* 580-587 (ICDMW). https://ieeexplore.ieee.org/document/8637513.

Ewing, R., Tian, G., & Lyons, T. (2018). Does compact development increase or reduce traffic congestion?. *Cities*, (72), 94–101. https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.08.010.

Sun, W., Guo, D., Li, Q., & Fang, H. (2021). School runs and urban traffic congestion: Evidence from China. *Regional Science and Urban Economics*, (86), 103606. https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2020.103606.

Dong, J., Zhang, H., Cui, M., Lin, Y., Wu, H.-Y., & Bi, C. (2024). TCEVis: Visual analytics of traffic congestion influencing factors based on explainable machine learning. *Visual Informatics*, 8(1), 56–66. https://doi.org/10.1016/j.visinf.2023.11.003.

De la Cruz-Nicolás, E., Martínez-Rebollar, A., Estrada-Esquivel, H., & Pliego-Martínez, O. A. (2023). Methodology to Obtain Traffic Data and Road Incidents Through Maps Applications. *In Ibero-American Congress of Smart Cities,* 3-17. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52517-9_1.

Rojas-Jimenez, K. Capítulo 5 Transformación, Estandarización e Imputación de Datos.(2022). Bookdown.org. Retrieved March 1, 2024, from https://bookdown.org/keilor_rojas/CienciaDatos/transformaci%C3%B3n-estandarizaci%C3%B3n-e-imputaci%C3%B3n-de-datos.html.

Curtis, A. E., Smith, T. A., Ziganshin, B. A., & Elefteriades, J. A. (2016). *The mystery of the Z-score*. Aorta, 4(04), 124-130. 10.12945/j.aorta.2016.16.014.

Guisande G. C., Vaamonde. A., Barreiro F, A. (2013). *Tratamiento de datos con R, Statistica y SPSS*. Editorial Díaz de Santos.

Olimpia L. (2020). *Información de Shannon: Bases teóricas, articulaciones conceptuales e interpretaciones*. CONICET.

Christopher, D.M., Prabhakar R., Hinrich S. (2008). Introduction to Information Retrieval, 13. CAMBRIDGE, University Press.

ISSN: 2992-8338

Revisión de la literatura: gobierno de datos en las organizaciones

Nohema Pérez-España, Javier Ortiz-Hernández, Yasmín Hernández***

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, CP 62490 México; e-mail: (d23ce174@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx, yasmín.hp@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract: Today's organizations are increasingly aware that the better the quality of the data they manage, the more they will be able to leverage it. The Data Governance establishes processes, policies, and technologies necessary to manage and ensure the availability, accessibility, quality, consistency, auditability, and security throughout the data lifecycle. However, for an organization to identify its level of maturity in terms of data governance, the use of a model is necessary. Maturity assessment models are essential for identifying the degree to which an organization has explicitly and consistently implemented processes. By understanding your degree of maturity, you can improve your data management through the implementation of best practices. This article outlines the main concepts of data governance, maturity levels, and models for assessing data governance maturity. Similarly, the analysis conducted during the literature review is evident, with the objective of understanding what data governance is and what it is not, as well as the work developed by expert researchers on the subject.

Keywords: gobierno de datos, modelo de madurez, data governance, data governance maturity model, data governance framework.

1. INTRODUCCION

En los últimos años, el volumen de los datos utilizados dentro de las organizaciones se ha incrementado drásticamente. En el año 2020 se estimó que el incremento fue en más de un 4,000%, debido principalmente al cambio de tecnologías digitales a analógicas y al incremento del consumo digital en la pandemia (Grupo IGN, 2023).

Junto al incremento del volumen de los datos la necesidad por conocer su valor y gestionarlo se ha vuelto parte fundamental en la operatividad de las organizaciones. En particular, los datos influyen tanto en el funcionamiento como en la toma de las decisiones estratégicas. Es aquí donde ha tomado mayor relevancia la gobernanza de los datos, la cual se ha vuelto crítica en la toma de decisiones y sugiere considerar a los datos como un activo valioso (Kathri and Brown, 2010).

Este documento contiene una descripción respecto a lo que actualmente se encuentra publicado en términos de gobierno de datos, desde la definición, los modelos existentes y la puesta en práctica. Teniendo como principal objetivo destacar la importancia de un gobierno de datos en la gestión de la información.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Metodología de la revisión de la literatura

La revisión de la literatura se llevó a cabo utilizando el marco de trabajo propuesto por Templier y Paré (2015), el cual consiste en un conjunto de pautas para guiar y evaluar las revisiones de la literatura de Sistemas de Información (SI) y especificar a qué tipo de revisión se aplican.

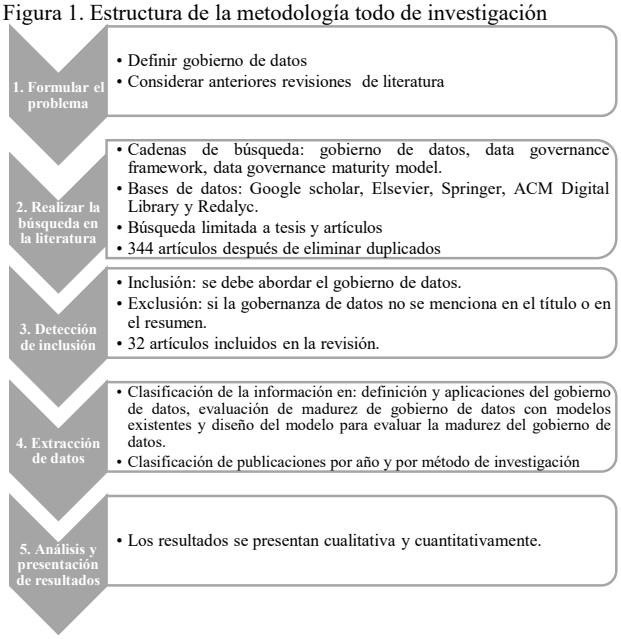
Los autores sostienen que el conjunto de directrices que proponen cubre todos los aspectos principales del proceso de revisión y se pueden utilizar apropiadamente para todas las formas de revisión, por esta razón se optó para implementarlo en la presenta investigación.

2.2 Implementación de la metodología de revisión de la literatura

Se realizó una adaptación de la metodología estructurada de Templier y Paré (figura 1).

ISSN: 2992-8338

Figura 1. Estructura de la metodología todo de investigación



Nota: Adaptada de Templier y Paré

Primer paso: se definieron los conceptos analizados y se establecieron límites respecto al contenido de la revisión .

Segundo paso: se identificaron las principales bases de datos confiables para la obtención de información y se procedió con la búsqueda de las palabras clave. Se consideraron únicamente tesis y artículos pues en su mayoría son estos documentos los que contienen información actualizada y que ha sido revisada previo a su autorización y/o publicación. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Resultados de la búsqueda de las palabras clave.

Base de datos	Gobierno de datos	Data governance framework	Data governance maturity model
Google Scholar	1,040	2,510	335
Elsevier	0	124	5
Springer	0	3	0
ACM Digital Library	1	26	4
Total	1,176	2,663	344

Del total de resultados que coincidían con las palabras de búsqueda, se hizo un filtro revisando los títulos, con el cual se redujo la búsqueda a solo 344 resultados.

Tercer paso: se especificaron los criterios de inclusión y exclusión, ya que derivado de la búsqueda general realizada en el paso dos, muchos de los artículos no eran relevantes para la investigación. Se optó por aquellos que incluían la conceptualización de gobierno de datos y modelos para evaluar la madurez del gobierno de datos, se excluyeron los que únicamente mencionaban el gobierno de datos como una de muchas otras disciplinas dentro del contenido general de la tesis y/o artículo. Una vez aplicados los criterios de inclusión y exclusión, se quedaron solo con 32 artículos.

Cuarto paso: se llevó a cabo la extracción de datos, presentándose la clasificación de los artículos seleccionados se clasificaron en: definición y aplicaciones del gobierno de datos, evaluación de madurez de gobierno de datos con modelos existentes y diseño del modelo para evaluar la madurez del gobierno de datos (figura 2).

Figura 2 Clasificación de artículos



También se realizó un análisis respecto a los años en que fueron publicados los artículos seleccionados, pudiendo identificar que fueron publicados entre el 2007 y el 2023, a lo largo de 16 años (figura 3). La mayor cantidad de artículos fue publicada en 2018, en el 2023 se ve una caída en el número de publicaciones, pero es posible que esto se deba a que únicamente se consideraron seis meses del año.

Figura 3 Número de publicaciones por año



Otro dato que se consideró relevante reportar es el método de investigación empleado en cada uno de los documentos seleccionados (figura 4).

Figura 4 Clasificación de publicaciones por método de investigación



Quinto paso: se llevó a cabo el análisis de la información contenida en los documentos, considerando tres preguntas clave (¿qué es el gobierno de datos?, ¿qué es un modelo de madurez? y ¿cuáles son los modelos para evaluar la madurez?) para dar un panorama general de la información

ISSN: 2992-8338

relevante obtenida como resultado de la revisión de la literatura.

2.3 ¿Qué es el gobierno de datos?

Korkohen et al., (2013), define el gobierno de datos como un enfoque organizacional para la gestión de datos que describen un conjunto de políticas y procedimientos formales para cubrir el ciclo completo de los datos, desde la adquisición hasta el uso y su eliminación.

De lo anterior podemos resaltar la importancia que se le da a las políticas y los procedimientos organizacionales aplicados durante todo el ciclo de vida de los datos. Es decir, resulta importante alinear las políticas a los objetivos organizaciones para que los resultados sean los esperados.

Otto, B. (2011) por su parte, sugiere que el gobierno de datos es un marco para toda la empresa en la asignación de tareas relacionadas con las decisiones, derechos y deberes para poder tratar adecuadamente los datos como un activo de la empresa.

Otto, B., (2011) coincide con Korkohen et. al (2013) en que el gobierno de datos debe ser visto como un beneficio para toda la organización y en el adecuado tratamiento de los datos.

Por su parte Panian, Z., (2010), menciona que el gobierno de datos establece los procesos, políticas, normas, organización y tecnologías necesarias para gestionar y asegurar la disponibilidad, accesibilidad, calidad, consistencia, auditabilidad, y seguridad de los datos en una organización.

Adicional a las similitudes con las definiciones previas en términos de inclusión de políticas y procedimientos definidos por la organización durante el ciclo de vida de los datos, Panian (2010) añade de manera puntual el término de auditabilidad y seguridad de los datos. Lo anterior brinda una definición mucho más clara y mejor descrita respecto a las anteriormente revisadas.

Existen también las definiciones de gobierno de datos proporcionadas por organizaciones dedicadas a la gobernanza y gestión de datos. Se describen las que se consideraron con mayor relevancia:
La Data Management Association DAMA(2017), menciona que el gobierno de datos es el ejercicio de autoridad y control (planificación, seguimiento y ejecución) sobre la gestión de activos de datos.

El Data Governance Institute (DGI, 2023), define al gobierno de datos como un sistema de decisiones, derechos y rendición de cuentas para los procesos relacionados con información, ejecutados bajo modelos que describen quién puede realizar acciones, con qué información, cuándo, bajo qué circunstancias y bajo qué métodos.

Finalmente, la International Business Machine Corporation (IBM), lo define como una disciplina de control de calidad para agregar nuevo rigor y disciplina en el proceso de administrar, usar, mejorar y proteger información organizacional.

DAMA, DGI e IBM, definen al gobierno de datos como un ejercicio, sistema y disciplina en el control de los datos y coinciden en que se enfoca en realizar un control del proceso de gestión de los datos, visualizándolos como un activo organizacional.

Una vez revisada la información sobre los conceptos de gobierno de datos, se procedió a la siguiente palabra clave, modelo de madurez.

2.4 ¿Qué es un modelo de madurez?

De acuerdo a la información encontrada en la revisión de la literatura, se identificó que el concepto de madurez está basado en el Modelo de Capacidad de Madurez (Capability Maturity Model CMM), desarrollado en 1984 por el Instituto de Ingeniería de Software (Software Engineering Institute SEI). Actualmente el CMM es conocido como Capability Maturity Model Integration (CMMI). Este modelo fue creado para ofrecer una metodología para desarrollar y optimizar procesos de desarrollo de software.

Dentro del CMMI la noción de madurez se refiere al grado en que una organización ha implementado procesos de manera explícita y consistente que están documentados, gestionados, medidos, controlados y continuamente mejorados (CMMI, 2014)

Por otra parte, específicamente hablando de modelos de madurez, de acuerdo con Okongwu, et al., (2013), son una colección estructurada de elementos que describen las características de los procesos efectivos en diferentes etapas de desarrollo; los modelos de madurez sugieren puntos de demarcación entre etapas y métodos de transición de una etapa a otra.
Becker, Knackstedt &Poppelbu, (2009:2013) mencionan que los modelos de madurez representan la evolución anticipada, deseada o típica de las trayectorias de los objetos en forma de etapas discretas. Típicamente, estos objetos son organizaciones o procesos.

De acuerdo con Poppelbub & Roglinger, (2011), los modelos de madurez realizan una evaluación descriptiva “tal cual” de las entidades u organizaciones bajo investigación. La cual a su vez proporciona un conjunto prescriptivo y claramente articulado de procesos sobre como lograr las mejoras deseadas para obtener el nivel de madurez esperado.

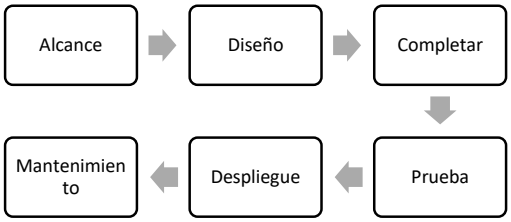
De las dos definiciones descritas anteriormente, es evidente que los modelos de madurez contienen diferentes fases o etapas, donde un conjunto predeterminado de procesos relevantes para el dominio se ha logrado.
Los modelos de madurez han proliferado a través de múltiples dominios desde que el concepto de medición de madurez fue introducido con el CMM (Capability Maturity Model) (De Bruin et al., 2005). Algunos de los principales modelos de madurez identificados en la revisión de la literatura son:

ISSN: 2992-8338

Crownston y Qin (2018), proponen un modelo de madurez de la capacidad (CMM) para gestión de datos científicos (SDM) cuyo objetivo es apoyar la evaluación y mejora de dichas prácticas.
Becker, J. et al. (2009), desarrollaron un procedimiento genérico y consolidado para el diseño de modelos de madurez utilizando un enfoque científico.

De Bruin et al. (2005), proponen una metodología genérica para el desarrollo de modelos de madurez en diversos dominios y lo ponen a prueba con ayuda de dos modelos de madurez, en Gestión de Procesos y en Gestión del conocimiento (figura 5).

Figura 5. Fases para el desarrollo del modelo de madurez



Nota: Traducido de "Understanding the main phases of developing a maturity assessment model", (De Bruin et al. 2005).

2.5 Modelos de madurez para el gobierno de datos

De acuerdo con la revisión de la literatura, se han identificado distintos trabajos cuyo objetivo ha sido el desarrollo de modelos de madurez de los datos y de gobierno de datos.
El CMM (Capability Maturity Model) es considerado el principal modelo de madurez (Crowston &Qin, 2012) y es uno de los principales referentes para los autores en el desarrollo de sus propios modelos.

Arezki, S. & Elhissi, Y., (2018) describe el uso de un modelo de autoevaluación de la Madurez del Gobierno de Tecnologías de la Información (ITGMM)el cual utiliza como referencia los marcos de trabajo EFQM y CobiT. El modelo consta de 5 niveles de madurez (0: No presente, 1: Inicializado, 2: Intuitivo, Definido, Gestionado y Optimizado) los cuales se evalúan mediante un cuestionario.

Carretero, A., et al. (2016), llevaron a cabo el desarrollo de un Modelo de Madurez de Datos (MAMD), el cual toma como modelo de referencia la ISO 8000-61 y la ISO/IEC 33000 y está compuesto por 18 procesos agrupados en las áreas de gestión de datos, gobierno de datos y gestión de calidad de datos. Una vez puesto en marcha dicho modelo se realiza una comparativa de éste con los procesos de ISO 8000-61, DMM, CobiT y DAMA. De esta manera los autores concluyen que cumple con las especificaciones requeridas para ser puesto en práctica.
Olaitan, O., et al., (2019) toman como referencia los marcos de trabajo CobiT e ISO/IEC 38500 para el Modelo de Evaluación de la Madurez del Gobierno de Datos (DGMEM). Este artículo propone un modelo de evaluación de la madurez del gobierno de datos para departamentos gubernamentales de la Provincia del Cabo Oriental, Sudáfrica. La metodología utilizada es la ciencia del diseño. El modelo fue probado a través de un enfoque exploratorio secuencial de métodos mixtos de recopilación y análisis de datos. Finalmente, los autores confirman la aplicabilidad del modelo en el contexto establecido y refuerzan los hallazgos de la literatura de que los modelos de madurez pueden usarse para mejorar la gobernanza de datos en las empresas públicas.

Finalmente, Marchildon, P., et al, (2018), proponen una herramienta que incluye 11 dimensiones y 72 preguntas para evaluar donde se encuentran en términos de gobernanza de datos y, a su vez, definir mejor y priorizar los objetivos. Se tomó como referencia el marco de trabajo propuesto por DAMA y el CMMI. Algunos otros modelos que fueron identificados en la literatura se muestran de manera resumida en la tabla 2.

Tabla 2 Modelos para evaluar la madurez del gobierno de datos

MODELOS	CARACTERÍSTICAS	**NIVELES DE MADUREZ**
MAMD	Sus referentes son ISO 8000-61 ISO/IEC 33000	0. Inmaduro 1. Básico 2. Gestionado 3. Establecido 4. Predecible 5. Innovado
IBM	Toma como referente el Modelo de Madurez de competencias (CMM) para definir sus niveles de madurez.	1. Inicial 2. Administrado 3. Definido 4. Administrado cuantitativamente 5. Optimizado
KALIDO	Fue desarrollado por Kalido (proveedor de software). Es un modelo prescriptivo, ya que proporciona los hitos de la organización, procesos y tecnología, que deben ser alineados, para poder avanzar a una etapa más madura.	1. Enfocada en la aplicación. 2. Enfocado en repositorios organizacionales 3. Enfocada en las políticas 4. Totalmente gobernado
DATAFLUX	Fue desarrollada por DataFlux Company que posteriormente fue absorbida por SAS Institute	1. Indisciplinados 2. Reactivo 3. Proactivo 4. Gobernado
EIM (GARTNER)	Fue desarrollado por Gartner, el modelo consta de seis etapas. Se creó para apoyar a los líderes de TI.	0. Inconsciente 1. Consciente 2. Reactivo 3. Proactivo 4. Gestionado 5. Efectivo
AIKEN ET AL	Sigue el modelo tradicional de CMM, pero de manera adicional incorpora la práctica, la calidad y los resultados de previsibilidad.	1. Inicial 2. Repetible 3. Definido 4. Administrado 5. Optimizado
MDM INSTITUTE	La escencia de este modelo es una migración desde el estado inicial que se describe como reactivo, sin control, que luego es impulsado a un enfoque formalizado.	1. Básico 2. Fundacional 3. Avanzado 4. Distintivo
ORACLE	Coincide con otros modelos en que se deben alinear correctamente a las personas, los procesos y las tecnologías para tener un gobierno de datos efectivo, y de esta manera convertir los datos en información y el conocimiento en activos estratégicos.	1. Marginal 2. Estable 3. Mejores prácticas 4. Transformacional

De acuerdo con la información mostrada en la tabla 2, el número de niveles de madurez considerados por cada uno de

ISSN: 2992-8338

los niveles oscila entre 4 y 5, siendo el primer nivel el inicial y el último el optimizado.

Del total de modelos de madurez de gobierno de datos enlistados anteriormente es posible identificar si la herramienta de diagnóstico propuesta por cada modelo es de acceso libre, comercial o si no cuenta con ninguna (figura 6).

Figura 6. Herramientas de diagnóstico en los modelos de madurez



De la figura n se pude apreciar que únicamente el 20% de los modelos identificados en la literatura brindan acceso a sus herramientas de evaluación, con lo cual se puede concluir que existen diversos retos y oportunidades en el gobierno de datos, específicamente en el desarrollo de modelos de madurez y sus respectivas herramientas de evaluación

2.6 Tendencias, retos y oportunidades de desarrollo profesional en el campo del gobierno de datos

Loja, N.M. (2020), Sugiere que las empresas de cualquier índole, públicas o privadas gestionen y cuiden sus datos, teniendo información veraz, actualizada y confiable a través del gobierno de datos, con el fin de ayudar a alcanzar objetivos planteados y sobre todo a tomar mejores decisiones.

Sin embargo, debido a los cambios tan significativos que existen debido al creciente incremento de datos, existen distintos retos y oportunidades para continuar trabajando con el gobierno de datos. Un estudio realizado por IDC en alrededor de 200 empresas alrededor del mundo muestra los siguientes retos y oportunidades (tabla 3).

Tabla 3 Retos y oportunidades en el gobierno de datos

Retos	Oportunidades
Clasificar los datos ante el incremento masivo de los mismos.	Implementar herramientas de metadata.
Falta de habilidades en términos de gobierno de datos.	Aprovechar tecnologías de inteligencia artificial/machine learning para automatizar el gobierno de datos y la gestión de actividades.
Diseñar un modelo de madurez que permita evaluar el gobierno de datos con herramientas de fácil acceso.	Aprovechar los marcos de trabajo de gestión y gobierno de datos existentes: DMBOK, COBIT, ISO 38500 a un sector específico.

El gobierno de datos es una disciplina emergente, cuyos principales retos son enfocarse en la digitalización, las regulaciones y la calidad de datos, lo anterior con el objetivo de mejorar continuamente la gestión de la cada vez más creciente cantidad de datos.

La seguridad de los datos también toma cada vez mayor relevancia, con la expansión del Big Data y de la analítica mediante Inteligencia Artificial y machine learning, los datos que pueden ser captados y procesados es inconmensurable. En este contexto, el machine learning será crítico para extraer la información relevante de la voluminosa cantidad de datos y sacar el mayor provecho de esta.

Por otra parte, las organizaciones que posean un mayor nivel de madurez en el gobierno de datos podrán mejorar la ejecución de sus procesos y ajustarlas al cumplimiento de sus objetivos organizaciones mediante la adecuada gestión de sus datos.

6. CONCLUSIONES

A partir del análisis de las fuentes consultadas se identificaron los principales conceptos sobre el gobierno de datos y los modelos de madurez mayormente utilizados por los investigadores en los últimos años.

Otro punto a resaltar es el limitado acceso a las herramientas de diagnóstico de los modelos existentes, lo cual resalta la importancia de generar propuestas de mejora para el diseño y desarrollo de modelos de madurez que permitan evaluar al gobierno de datos dentro de las organizaciones.

Se espera que la información contenida sirva de referente para quienes actualmente se encuentren interesados en el gobierno de datos o que deseen incursionar en este tema, ya que al ser una disciplina que ha tomado mayor relevancia en los últimos años, representa una importante área de oportunidad para el desarrollo de nuevos modelos, métodos y marcos de trabajo que faciliten su implementación y evaluación.

REFERENCIAS

Adesola, A., Rosita, D., (2021). A review of data governance challenges in smart farming and potential solutions. 2021 IEEE International Symposium on Technology and Society (ISTAS) DOI: 10.1109/ISTAS52410.2021.9629169

Alhassan, I., Sammon, D., Daly, M., (2016). Data governance activities: an analysis of the literature. Journal of decision system. Vol.5, No. S1, 64-75. http://dx.doi.org/10.1080/12460125.2016.1187397

Alhassan, I., Sammon, D., Daly, M., (2018). Data governance activities: a comparison between scientific and practice-oriented literature. Journal of Enterprise Information Management, Vol. 31 Issue: 2, pp.300-316, https://doi.org/10.1108/JEIM-01-2017-0007

Arezki, S. & Elhissi, Y., 2018, Toward an IT Governance Maturity self-assessment Model Using EFQM and CobiT, *Association for Computing Machinery*. 198-202

Becker, J., Knackstedt, R. & Poppelbu, J., 2009, 'Developing maturity models for IT management: A procedure model and its application', Business & Information Systems Engineering 1(3), 213–222.

Begg C., Caira, T., (2012). "Exploring the SME Quandary: Data Governance in Practise in the Small to Medium-

ISSN: 2992-8338

Sized Enterprise Sector" The Electronic Journal Information Systems Evaluation Volume 15 Issue 1 2012, (pp03 -13), available online at www.ejise.com

Bruin, T., M. Rosemann, R. Freeze, and U. Kulkarni, "Understanding the main phases of developing a maturity assessment model", Australasian Conference on Information Systems (ACIS), Sydney, Australia: 2005, pp. 1-11.

Carretero, A., Caballero, I., & Piattini, M., (2016). Evaluación del nivel de madurez de datos usando MAMD: un estudio de caso. https://www.researchgate.net/publication/308020578

CMMI Institute. (2014). Data Management Maturity (DMM) Model. CMMI Institute.

DAMA-DMBOK, Data Management Body of Knowledge, Technics Publications, 2nd Edition, 2017, pp. 67-96.

Data Governance Institute (DGI), (2023), Definitions of Data Governance, viewed 06 Octubre 2023, de Definitions of Data Governance - The Data Governance Institute

Grupo IGN, https://ignsl.es/historia-del-big-data/, consultado del 6 de septiembre 2023.

IBM (2007): "The IBM data governance council maturity model: building a roadmap for effective data governance". IBM Corporation.

Khatri, V. and Brown, C.V. (2010), Designing data governance, *Communications of the ACM*, Vol. 53 No. 1

Korhonen, J.J., Melleri, I., Hiekkanen, K. & Helenius, M., 2013, Designing data governance structure: An organizational perspective, *GSTF Journal on Computing (JoC)* 2(4), 11–17.

Marchildon, P., et al., Data Governance Maturity Assessment Tool: A Design Science Approach. https://www.cairn.info/revue-projectique-2018-2-page-155.htm

Mirza, I., Nizar, A., (2022). Data governance maturity assessment: a case study directorate general of corrections. International Conference on ICT for smart society (ICISS). DOI: 10.1109/ICISS55894.2022.9915243

Niemi, E., (2013). Working paper: designing a data governance framework. https://www.researchgate.net/publication/257194534

Okongwu, U., Morimoto, R. & Lauras, M., (2013), The maturity of supply chain sustainability disclosure from a continuous improvement perspective, Journal of Productivity and Perform

Olaitan, O., Herselman, & M., Wayi, N., 2019, A Data Governance Maturity Evaluation Model for government departments of the Eastern Cape Province, *South Africa. South African Journal of Information Management*. ISSN: (Online) 1560-683X, (Print) 2078-1865

Olutoyin, O., Herselman, M., Wayi, N., (2019). A data governance maturity evaluation model for government departments of the Eastern Cape province, South Africa. Journal of Information Management 21(1), a996. https://doi.org/10.4102/ sajim.v21i1.996

Otto, B. (2011), Organizing data governance: findings from the telecommunications industry and consequences for large service providers, *Communications of the Association for Information Systems*, Vol. 29 No. 3, pp. 45-66, available at: http://aisel.aisnet.org/cais/vol29/iss1/3

Panian, Z. (2010), Some practical experiences in data governance, *World Academy of Science, Engineering and Technology Management*, Vol. 62, pp. 939-946.

Poppelbub, J. & Roglinger, M., (2011), What makes a useful maturity model. A framework of general principles for maturity models and its demonstration in business process management, *AIS Electronic Library (AISel), Helsinki, Finland* pp. 1–13,

Portilla, J.D., (2017). Gobierno de datos, un potenciador de los sistemas de gestión de calidad. DOI: http://dx.doi.org/10.15332/s2145-1389.2017.0002.10

Porntida, K., (2022). Data governance framework as initiative for higher educational organization. Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT & NCON) DOI: 10.1109/ECTIDAMTNCON53731.2022.9720396

Rene, A., Johannes, S., Jan Vom, B., (2019). Data governance: A conceptual framework, structured review, and research agenda. International Journal of Information Management 49(2019) pp. 424-438. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.07.008

Templier, M., & Paré, G. (2015). A Framework for Guiding and Evaluating Literature Reviews. Communications of the Association for Information Systems, 37, pp-pp. https://doi.org/10.17705/

Thammaboosadee, S., Dumthanassarn, N., (2018). Proposed Amendments of Public Information act towards Data Governance tramework for open government data: Context of Thailand. Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON2018). 978-1-5386-7573-1/18/$31.00 ©2018 IEEE

Yuan, F., Li, Y., Meng, J., (2020). Research on the model of "data-based governance" in Colleges and Universities. International Conference on Big Data and Informatization Education (ICBDIE). DOI 10.1109/ICBDIE50010.2020.00012

ISSN: 2992-8338

A general view of attacks in the age of cyber-technologies

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:brianmanuel.gonzalez@uatx.mx).*

Abstract: The Industry 4.0 paradigm has reached the entire world as a result of globalization, thus Mexico is working to develop in applications based on the usage of digital technology inherent in this transformation. Cyber-physical systems are an essential element that incorporate complete control systems capable of interacting in a network, ranging from simple applications in buildings and living areas to the most complex applications in industries such as energy, automotive, and aerospace. As sophisticated systems, they are vulnerable, which becomes more apparent when they are part of a communication network. At the same time, understanding how these systems typically perform and when they are under attack schemes, i.e., when their functionality is harmed by these vulnerabilities in order to cause damage to the same system and users, becomes critical. This paper describes the key concepts and characteristics of cyber-physical system attacks.

Keywords: Cyber-physical systems, Embedded systems, Networked control systems, Cyber-attacks, Industry 4.0.

1. INTRODUCCIÓN

El paradigma de la Cuarta Revolución Industrial (CRI) o Industria 4.0, impacta a las naciones, organizaciones y mercados globales (Rana & Rathore, 2023), aunque no todos los países cuentan con las infraestructuras y contextos sociales adecuados para adaptarse eficientemente a este cambio. En el caso de México, este proceso representa una oportunidad y desafío para mejorar la investigación tecnológica, el desarrollo de nichos especializados y la formación de capital humano apropiado. En términos de digitalización, el gobierno mexicano ha avanzado progresivamente, automatizando diversas operaciones y promoviendo el intercambio de datos entre dependencias (Garduño Palomino, 2021).

Las innovaciones más notables se han dado en sectores de servicios, como el financiero, y, en mayor medida, en tecnologías avanzadas en industrias de exportación, como la automotriz y la aeroespacial. Derivado de lo anterior, se generan retos por enfrentar por parte de las pequeñas y medianas empresas (pymes) para adoptar una estrategia de transición hacia la CRI, ya que la mayoría de ellas se enfrentan a obsolescencia tecnológica. En este nuevo entorno, es crucial que las empresas mexicanas capaciten a su personal con habilidades tecnológicas actualizadas y establezcan una estructura organizacional funcional, ya que estos elementos son esenciales para afrontar con éxito los cambios que genera esta revolución (Cardin, 2019). Entre las tecnologías destacables, que son pilares dentro de su desarrollo e impulso (Rana & Rathore, 2023), se encuentran los sistemas ciber-físicos (Cyber-Physical Systems, CPS).

Desde el punto de vista de la ingeniería, los CPS se consideran los sistemas industriales más prometedores dentro del área de las redes de transporte, los sistemas energéticos, las redes de distribución de agua/gas y las plantas/fábricas no tripuladas (Ding et al., 2019).

Los CPS son sistemas de entidades computacionales colaborativas que están en conexión intensa con el mundo físico circundante y sus procesos en curso, proporcionando y utilizando, al mismo tiempo, servicios de procesamiento y acceso a datos disponibles en red (Monostori et al., 2016). El software integrado en los CPS utiliza sensores y actuadores, se conectan entre sí y con operadores humanos mediante la comunicación a través de interfaces, disponen de capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos procedentes de los sensores o de la red. Debido a que están caracterizados como sistemas físicos y de ingeniería cuyas operaciones son supervisadas, controladas, coordinadas e integradas por un núcleo informático y de comunicación, su interacción puede analizarse desde la perspectiva de un sistema de control en red.

Básicamente, un sistema de control en red, (Networked Control System – NCS) puede definirse como un sistema de control realimentado que se cierra a través de un canal de comunicación o de una red en tiempo real, que puede ser compartida con otros nodos externos al sistema de control principal (Gautam et al., 2021). De acuerdo con esas características, un sistema ciber-físico es una categoría de NCS, en virtud de que se trata de un conjunto de sensores, actuadores y controladores conectados a través de una red de comunicación (Teixeira et al., 2015).

Todo lo anterior, sin embargo, también involucra la susceptibilidad a los problemas de seguridad debido a los varios componentes de hardware y software que funcionan conjuntamente vinculados a través de una red. Además de la seguridad del hardware y del software, también se debe tener en cuenta cuestiones operativas por razones de seguridad y fiabilidad (Ding et al., 2019; Xu et al., 2021).

ISSN: 2992-8338

Es en ese sentido que este trabajo busca presentar los conceptos de base acerca de los ataques que pueden sufrir los CPS asumiendo su importancia dentro del desarrollo de la CRI, así como su paulatina incorporación en los diferentes sectores del desarrollo tecnológico del país.

1.1 Descripción de sistemas en red

Un sistema general de control por realimentación tiene cuatro componentes: (1) el fenómeno físico de interés (a veces denominado "planta"); (2) sensores que observan el sistema físico y envían una serie temporal $y(k)$ que denota el valor de la medida física en el momento o instante k (por ejemplo, el flujo de agua a las 3 de la madrugada es de 25 l/min); (3) basándose en las mediciones $y(k)$ provenientes de los sensores, el controlador envía órdenes de control $u(k)$ (por ejemplo, abrir una válvula al 10%) a los actuadores; y (4) actuadores que transforman la orden de control en un cambio físico real (el dispositivo que abre o cierra la válvula). En términos de un NCS, la Fig. 1 muestra los elementos básicos de la descripción previa (Gautam et al., 2021).

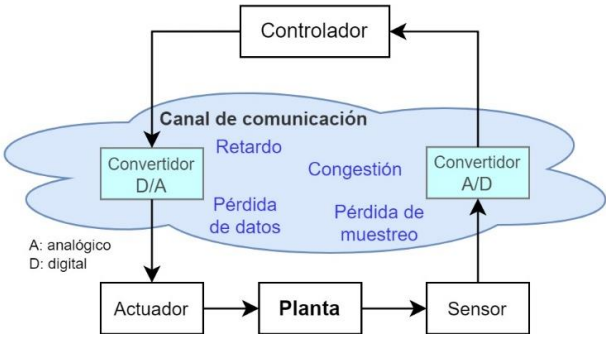


Figura 1. Descripción general de un NCS.

De acuerdo con la imagen, la capa de comunicación de red es propensa a pérdidas de datos o paquetes, retrasos y otros problemas propios de la red, por lo que los datos de sensores y actuadores pueden no ser confiables. Pero para centrarse en la dinámica de los CPS debida a los ciber ataques, es práctica común asumir que los problemas propios de comunicación en red no se consideren pues existe abundante bibliografía dedicada a esas cuestiones (Gautam et al., 2021).

De esta manera, se supone que las posibles discrepancias entre los datos transmitidos y los recibidos se deben exclusivamente a ataques malintencionados. Asimismo, se asume que la red de comunicación es fiable y no afecta a los datos que circulan por ella. Gracias a ello, es posible simplificar el modelo de forma que pueda analizarse conceptualmente desde el punto de vista de la ciber seguridad (Cardenas et al., 2008), como lo muestra la Fig. 2.

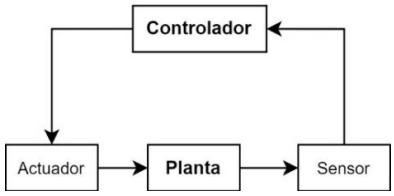


Figura 2. Representación simple para efectos de análisis.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS ATACANTES

Según la definición de la ISO/IEC 27000-2019 (ISO/IEC 27000, 2019), un ataque es un intento de destruir, divulgar, alterar, bloquear, robar, obtener acceso no autorizado a un activo o utilizarlo sin autorización. Toda aquella acción principalmente deliberada cuyo objetivo es dañar un sistema (existen casos no deliberados en donde las consecuencias son similares), con enfoques sigilosos para permanecer invisibles y causar el máximo daño, provocando colapsos económicos e incluso atentar contra la vida. Los atacantes tienen diferentes motivos para realizar ciberataques, entre ellos, los beneficios económicos, los beneficios políticos o el ciberterrorismo (Rocchetto & Tippenhauer, 2016).

2.1 Cualidades de seguridad de los CPS

La conocida tríada CID (confidencialidad, integridad y disponibilidad) es un modelo de referencia utilizado para evaluar la seguridad de la información (Kordestani & Saif, 2021; Teixeira et al., 2015). La *confidencialidad* es la propiedad que impide que usuarios no autorizados accedan a información privada. La *integridad* significa que los datos deben mantener su exactitud y totalidad. La *disponibilidad* implica que la información debe estar siempre accesible cuando se requiera para el propósito del servicio (Teixeira et al., 2015).

En los CPS se consideran aspectos relacionados con el factor humano. De acuerdo con (Cardin, 2019), se describen los siguientes tipos de interacción de los CPS con el operador o usuario:

- ✓ Autonomía: el sistema toma todas las decisiones necesarias sin intervención del operador.
- ✓ Automatización: el sistema guía al operador durante las tareas, tomando la mayoría de las decisiones.
- ✓ Herramienta: el operador gestiona el sistema y es responsable de la mayoría de las decisiones.
- ✓ Gestión: el sistema sólo proporciona datos al operador, quien toma todas las decisiones.

Estas relaciones humanas con los CPS son los que definen las interacciones que derivan en las acciones malintencionadas por parte de los atacantes.

2.2 Definiciones básicas

Un individuo u objeto lógico se considera intruso o atacante si accidental o deliberadamente comete una acción que conlleva consecuencias negativas (ISO/IEC 27000, 2019). El modelo del atacante, o perfil, caracteriza las posibles formas de interacción entre el atacante y el sistema objetivo, en particular, define las restricciones para el atacante. El resultado del análisis del modelo del atacante es una suposición sobre los tipos y el potencial de los intrusos que pueden poner en práctica amenazas a la seguridad de los CPS con características y funcionamientos determinados (Rocchetto & Tippenhauer, 2016).

La clasificación de los atacantes permite evaluar sus capacidades en función del tipo de acceso al sistema, el nivel de conocimientos, las posibles intenciones y los recursos disponibles (Rocchetto & Tippenhauer, 2016). El tipo de

ISSN: 2992-8338

acceso permite distinguir entre un intruso externo e interno, un usuario ordinario y un administrador. El nivel de conocimientos es una característica del atacante, que indica sus competencias técnicas para iniciar y llevar a cabo un ataque. Además, esta característica describe el conocimiento que tiene el intruso de la arquitectura del sistema objetivo y de las medidas de protección existentes. La intención del atacante indica el propósito del ataque al sistema. Este parámetro es difícil de cuantificar y es muy dinámico. Los recursos disponibles de un atacante incluyen recursos de hardware y software que pueden utilizarse para desplegar un tipo específico de ataque (Lanotte et al., 2020).

2.3 Descripción y clasificación de atacantes

Los intrusos internos se dividen en ocho categorías en función del método de acceso y la autoridad de acceso (Rocchetto & Tippenhauer, 2016):

Categoría 1: personas que tienen acceso autorizado al sistema y garantizan su funcionamiento normal;
Categoría 2: usuarios registrados del sistema que tienen acceso limitado a sus recursos desde el lugar de trabajo;
Categoría 3: usuarios registrados del sistema que proporcionan acceso remoto a sus recursos;
Categoría 4: usuarios registrados del sistema con los privilegios de un administrador de seguridad para un segmento separado del sistema;
Categoría 5: usuarios registrados con la autoridad del administrador del sistema;
Categoría 6: usuarios registrados con privilegios de administrador de seguridad del sistema;
Categoría 7: desarrolladores del software del sistema y personas que proporcionan su apoyo;
Categoría 8: desarrolladores y personas que proporcionan la entrega, el mantenimiento y la reparación de equipos del sistema.
De acuerdo con (ISO/IEC 27000, 2019), el potencial del intruso o atacante puede establecerse de la siguiente forma:

Potencial bajo. El intruso tiene información sobre las vulnerabilidades de elementos individuales de los CPS, publicada en fuentes públicas, mientras utiliza herramientas disponibles públicamente o herramientas creadas por él mismo.

Potencial medio. El intruso tiene todas las capacidades de los intrusos de potencial bajo y también tiene conocimiento de las medidas de protección utilizadas en el sistema; además, el intruso tiene información sobre las vulnerabilidades de elementos individuales del sistema y utiliza herramientas de software disponibles gratuitamente para llevar a cabo ataques, y también tiene acceso a información sobre las características y rasgos del funcionamiento del sistema.

Potencial alto. El intruso tiene todas las capacidades de un intruso con un potencial medio, y también puede obtener acceso no autorizado a los CPS desde redes de comunicación dedicadas; además, un atacante de este tipo tiene acceso al software y hardware del sistema, conoce bien las medidas de protección utilizadas en él, y también tiene información sobre las vulnerabilidades del sistema, lleva a cabo investigaciones sobre el sistema atacado y utiliza herramientas altamente especializadas.

Asimismo, la clasificación de atacantes incluye los siguientes tipos (Rocchetto & Tippenhauer, 2016):

- *Aficionado o amateur*: utiliza herramientas de acceso público para atacar el sistema y tiene acceso estándar al hardware, el software y a la conexión a Internet.
- *Intruso interno*: tiene privilegios en el sistema (por ejemplo, usuario, supervisor, administrador).
- *Hacktivista*: utiliza sus habilidades para manifestar una actividad política.
- *Ciberterrorista*: atacante con motivaciones políticas que utiliza sus habilidades para cometer delitos.
- *Ciberdelincuente* o *cibercriminal*: atacante con amplios conocimientos y habilidades de seguridad, cuyos objetivos pueden ir desde el chantaje hasta el espionaje y el sabotaje.
- *Facción*: grupo de personas, a veces financiado por el gobierno, que suele tener como objetivo atacar sistemas de infraestructuras críticas.

El atacante se clasifica según el tipo de acceso al sistema y sus capacidades (ISO/IEC 27000, 2019):

Tipo 0: el atacante no tiene acceso directo a la infraestructura ni a servicios del sistema, sólo puede utilizar métodos de ingeniería social (utilización de información confidencial a través de la manipulación de los usuarios);
Tipo 1: el atacante interactúa con la infraestructura y los servicios del sistema de forma indirecta, proporcionando acceso indirecto a los mismos;
Tipo 2: un atacante afecta directamente a la infraestructura del sistema o a sus servicios, estando a cierta distancia del perímetro controlado;
Tipo 3: un atacante tiene acceso físico a la infraestructura del sistema, pero no puede investigar y modificar los componentes electrónicos internos;
Tipo 4: el intruso tiene acceso total a la infraestructura del sistema y a todos los elementos e interfaces internos.

En (Lanotte et al., 2020; Rocchetto & Tippenhauer, 2016), los autores distinguen los siguientes niveles de capacidad de los atacantes:

Nivel 1: uso de herramientas disponibles públicamente y explotación de vulnerabilidades conocidas del sistema;
Nivel 2: capacidad para identificar y explotar vulnerabilidades previamente desconocidas y desarrollar nuevas herramientas para influir en el sistema objetivo;
Nivel 3: capacidades de nivel 2 y recursos casi ilimitados para llevar a cabo los ataques.

Así pues, la clasificación propuesta por esos autores permite considerar a los atacantes desde el punto de vista del tipo de acceso, recursos y conocimientos necesarios para llevar a cabo con éxito las acciones del ataque.

3. DESCRIPCIÓN DE ATAQUES

De acuerdo con (Kordestani & Saif, 2021), las técnicas para detectar ciber-ataques pueden clasificarse en dos grupos: *seguridad de la información* y *control de seguridad*. Los

ISSN: 2992-8338

aspectos de las TICs son los que se incluyen en el primer grupo, es decir, la confidencialidad a través del control de acceso, autentificación, integridad de los mensajes, entre otros. El control de la seguridad se enfoca en la parte física de los sistemas, en este caso se habla de ataques a los sensores, actuadores y controladores. Aunque las técnicas de seguridad de la información suelen tener en cuenta el cifrado y la protección de los datos, la naturaleza y el objetivo de los ataques son afectar a los sistemas físicos, por ejemplo, mediante la transmisión de órdenes inadecuadas o incorrectas y tal vez destructivas hacia los controladores. Es por ello que ambas partes deben considerarse: ciber y física.

3.1 Algunos tipos de ataques más comunes

Otra forma de clasificar los ataques se realiza a través de sus mecanismos de funcionamiento (Park et al., 2019), también vistos como escenarios de ataque (Rocchetto & Tippenhauer, 2016; Teixeira et al., 2015; Xu et al., 2021): ataques a la integridad, ataques de dinámica cero, ataques de reinicio, ataques de interferencia, ataques encubiertos, ataque de inyección de sesgo, ataque lineal óptimo, ataque de ubicación de conmutación, ataque de muestreo a multivelocidad.

Los ataques de *dinámica cero* son del tipo sigiloso debido a que el atacante duplica la dinámica cero inestable de las plantas de fase no mínima, esto da como resultado una señal de ataque que se oculta en el denominado espacio nulo de salida, incluso si se inyecta una gran cantidad de datos falsos en la planta.

Los ataques de *intermediario* (*man-in-the-middle*, MITM) modifican en secreto el contenido de la comunicación entre dos partes.

Los ataques de *reinicio* se aplican directamente en sistemas que poseen módulos de estimación del sistema, en donde el estado inicial se reinicia en cero o en algún otro valor, aunque en otros casos en donde no exista un estimador, los valores de las variables de interés se reinician en cero (Ni et al., 2020).

Los ataques de *repetición* son denominados críticos, pues se llevan a cabo en dos fases. En la primera fase, el atacante graba los valores reales proporcionados por los sensores. Posteriormente, el atacante utiliza los datos grabados para sustituir los datos reales, lo que puede provocar una degradación del rendimiento, inestabilidad, y podría permitir realizar ataques físicos indetectables. Normalmente se graban los datos del estado estable para repetirlos cuando intentan un ataque y este no sea detectado ocultando los efectos del ataque.

En los ataques *encubiertos*, el atacante añade su señal de ataque a la entrada de control de la planta. Simultáneamente, simula la influencia de su señal de ataque en las salidas de la planta. Estas salidas simuladas se utilizan para compensar la influencia del atacante en las salidas.

3.2 Clasificación de los ciber-ataques

Los ataques a los CPS se pueden agrupar en dos categorías en función de cuál sea el objetivo dentro de la estructura ciber-física. Desde una perspectiva más amplia, se distinguen los ataques basados en datos, o sea, los que se perpetran inyectando datos engañosos en el sistema, y los ataques basados en la red, es decir, los que se realizan inyectando o suprimiendo paquetes de datos en la red o alterando los flujos de comunicación en la infraestructura de comunicaciones. La Fig. 3 muestra esa clasificación (Canonico & Sperlì, 2023).

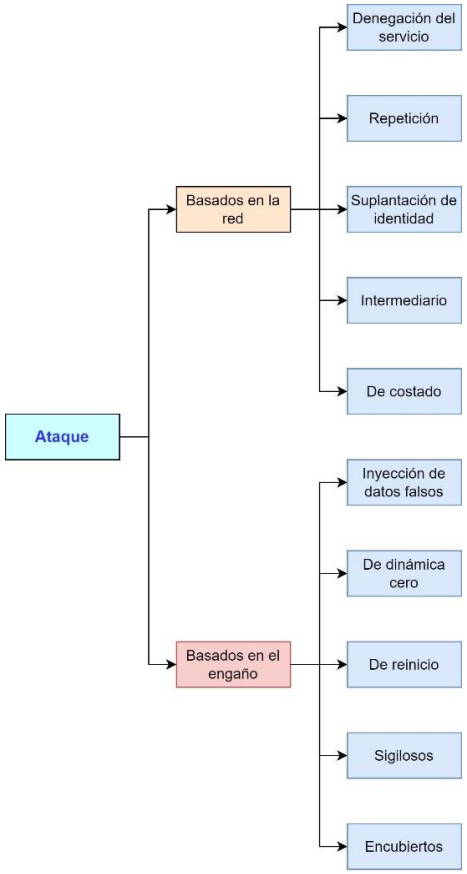


Figura 3. Clasificación de ciber ataques.

En general y desde el punto de vista de la descripción matemática para fines de análisis, los ciberataques pueden dividirse en dos categorías según su naturaleza (Kordestani & Saif, 2021): 1) *denegación de servicio* (*denial of service*, DoS) e 2) *inyección de datos falsos* (*false data injection*, FDI) o *engaño*. Estos ataques provocan pérdidas de datos y merman la integridad de la información. En otras palabras, pueden ser vistos como orientados específicamente a dañar y perder la disponibilidad y la integridad (Xu et al., 2021).

Ataques DoS: pueden ser el resultado de una interrupción o bloqueo de los datos procedentes de sensores, actuadores y sistemas de control. Un atacante puede interferir un canal de comunicación, inundar un canal con datos aleatorios e impedir que los dispositivos transmitan información.

Ataques de engaño: se trata de ataques donde se accede a los datos de medición reales de diversas partes de un sistema y se sustituyen por versiones corruptas o falsas destinadas a causar daño. El ataque se centra en la integridad de los datos modificando los paquetes de datos. Los ataques de engaño son más difíciles de identificar que los ataques DoS, ya que el acceso a los datos está fácilmente disponible. Sin embargo, la

ISSN: 2992-8338

veracidad de los datos es difícil de discernir. Tomando esto en cuenta, prácticamente todos los ciber-ataques mostrados en la Figura 4 pueden describirse matemáticamente a través de variantes de ataques DoS o de engaño.

En (Fei & Shen, 2023) se propone clasificar los ataques contra CPS en función del nivel o capa del sistema: físico, de red o de aplicación, que corresponde a la jerarquía funcional de redes. La Fig. 4 ilustra estas capas.

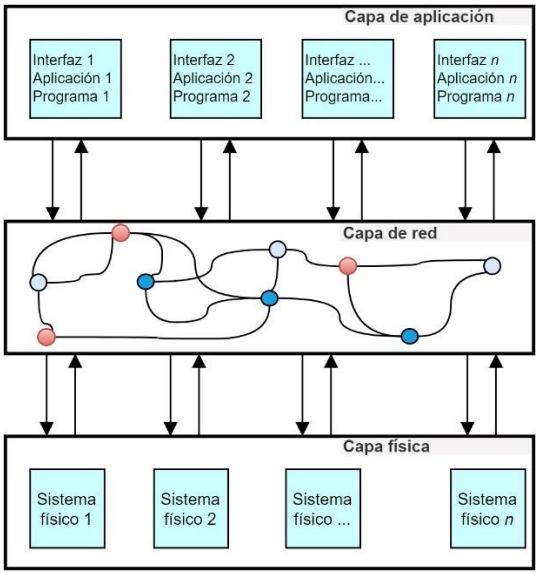


Figura 4. Capas de los CPS donde ocurren los ataques.

Al mismo tiempo, para cada nivel, se distinguen las acciones de ataque correspondientes (Fei & Shen, 2023):

- Capa de aplicación. Acceso no autorizado, fuga de datos, inyección de código malicioso, intercepción de controles, virus, troyanos e inyección de bases de datos.
- Capa física. Inutilización de equipos, interrupción del funcionamiento de equipos, interrupción de alimentación eléctrica, intercepción de señales electromagnéticas, denegación de servicio, intercepción y modificación de datos, interrupción de la transferencia de datos, acceso no autorizado.
- Capa de red. Denegación de servicio centralizado o distribuido, manipulación del proceso de enrutamiento, redirección o pérdida de la red, redireccionamiento o pérdida de datos, desbordamiento del búfer.

Esta clasificación es pertinente desde el punto de vista de los CPS como NCS, ya que es la forma más fácil de identificar los ataques a los componentes del sistema de control. En este sentido los ataques del tipo DoS o de engaño sigue siendo válida. El primer caso aplica en la capa de red, mientras que los de engaño aplican en la capa física.

4. ACCIONES DE LOS CIBER-ATAQUES

Una etapa igualmente importante en el proceso de identificación de las amenazas a la seguridad de los CPS es el análisis de las acciones que pueden conducir a una violación de la tríada CID del sistema. Al mismo tiempo, los ataques pueden producirse en diferentes niveles del sistema, incluyendo muchas etapas, extenderse en el tiempo y afectar a sus diversos elementos. Y aunque la variedad de acciones atacantes se estudia activamente en la comunidad científica, por el momento no existe una clasificación única de las mismas (Canonico & Sperlì, 2023; Lanotte et al., 2020).

4.1 Acciones de los ataques

Las acciones de ataque a los sistemas CPS, se distinguen los siguientes tipos (Park et al., 2019):

- Debilitamiento del perímetro de la red mediante puertas traseras (*backdoors*).
- Explotación de vulnerabilidades en los protocolos utilizados.
- Intercepción del control de dispositivos individuales del sistema.
- Perturbación de la base de datos.
- Intercepción y modificación los mensajes de la red.
- Modificar la hora del sistema para detener el trabajo de los equipos de protección.

Las acciones de ataque a la red se clasifican en función de los recursos, la topología y el tráfico (ISO/IEC 27000, 2019):

a. Por influencia sobre los recursos. Dirigidos (denegación de servicio, desbordamiento de la tabla de encaminamiento) y no dirigidos (escalada de privilegios).
b. Por influencia sobre la topología. Reduciendo el rendimiento (sustitución de la tabla de encaminamiento, "embudo", "agujero de gusano") y aislando ("agujero negro").
c. Por influencia en el tráfico. Escuchar secretamente (husmeo y análisis del tráfico) e intercepción (degradación de seguridad, suplantación de identidad).

4.2 Ciber-ataques comunes en CPS

A manera de ejemplo general, se presentan los ataques posibles en CPS (Cardenas et al., 2008), los cuales se muestran en la Fig. 5. *d* y *e* representan ataques de engaño, en los que el adversario envía información falsa $\tilde{y} \neq y$ (señal medida) ó $\tilde{u} \neq u$ (señal de control) desde (uno o más) sensores o controladores, respectivamente. La información falsa puede incluir: una medición incorrecta, el momento incorrecto en que se observó la medición o el id de remitente incorrecto. El adversario puede lanzar estos ataques obteniendo la clave secreta o comprometiendo algunos sensores (*d*) o controladores (*e*). *a* y *b* representan ataques DoS, en los que el adversario impide que el controlador envíe datos o que reciba las mediciones de los sensores. Para lanzar un DoS, el adversario puede interferir los canales de comunicación, comprometer los dispositivos e impedir que envíen datos, atacar los protocolos de enrutamiento, etc. En el caso de *f*, este representa a un atacante que ha comprometido el controlador y envía señales de control incorrectas a los actuadores. *c* representa un ataque directo contra los actuadores o un ataque físico externo a la planta: desde una perspectiva algorítmica, no se puede hacer más que detectarlos. Por lo tanto, solo se pueden realizar esfuerzos para disuadir y prevenir el daño y

ISSN: 2992-8338

ataques directos contra el sistema físico. Aunque estos ataques serían más devastadores, es normal que un atacante evitará el riesgo directo y por ello lanzará ciberataques *a*, *b*, *d*, *e* y *f* debido a: (1) es más difícil identificar y perseguir a los culpables, (2) no le resulta físicamente peligroso, (3) el atacante puede no estar limitado por la geografía o la distancia a la red (Teixeira et al., 2015).

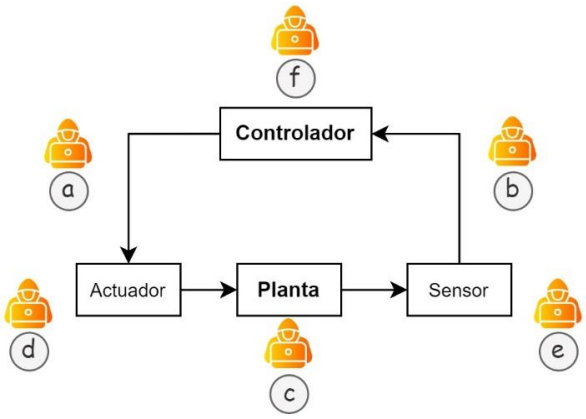


Figura 5. Descripción de ataques en los CPS.

5. CONCLUSIONES

Se presentó un panorama general sobre los tipos de ataques propios que pueden presentarse en los sistemas ciber-físicos (CPS). La descripción acerca de los ataques se da desde una perspectiva cualitativa con la finalidad de proporcionar elementos de base para su comprensión por parte de la comunidad interesada en identificar las características asociadas con el paradigma de la cuarta revolución industrial o industria 4.0. En trabajos futuros se presentarán las características cuantitativas de los ataques con la finalidad de mostrar los comportamientos en los diferentes componentes de los CPS, así como su reconocimiento a través de características generales de acuerdo con su respuesta temporal y estacionaria.

REFERENCIAS

Canonico, R., & Sperlì, G. (2023). Industrial cyber-physical systems protection: A methodological review. *Computers & Security*, *135*, 103531. https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103531

Cardenas, A. A., Amin, S., & Sastry, S. (2008). Secure Control: Towards Survivable Cyber-Physical Systems. *2008 The 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 495–500. https://doi.org/10.1109/ICDCS.Workshops.2008.40

Cardin, O. (2019). Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework. *Computers in Industry*, *104*, 11–21. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.10.002

Ding, D., Han, Q.-L., Wang, Z., & Ge, X. (2019). A Survey on Model-Based Distributed Control and Filtering for Industrial Cyber-Physical Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *15*(5), 2483–2499. https://doi.org/10.1109/TII.2019.2905295

Fei, C., & Shen, J. (2023). Machine learning for securing Cyber–Physical Systems under cyber attacks: A survey. *Franklin Open*, *4*, 100041. https://doi.org/10.1016/j.fraope.2023.100041

Garduño Palomino, K. Y. (2021). State of progress of industry 4.0 in the maquiladora: effects on employment in Mexicali, Mexico. *PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad*, *11*(21), 1–27. https://doi.org/10.32870/Pk.a11n21.644

Gautam, M. K., Pati, A., Mishra, S. K., Appasani, B., Kabalci, E., Bizon, N., & Thounthong, P. (2021). A Comprehensive Review of the Evolution of Networked Control System Technology and Its Future Potentials. *Sustainability*, *13*(5), 2962. https://doi.org/10.3390/su13052962

ISO/IEC 27000. (2019). Information technology - Security techniques - Information security management systems - Overview and vocabulary. En *ISO/IEC* .

Kordestani, M., & Saif, M. (2021). Observer-Based Attack Detection and Mitigation for Cyberphysical Systems: A Review. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, *7*(2), 35–60. https://doi.org/10.1109/MSMC.2020.3049092

Lanotte, R., Merro, M., Munteanu, A., & Viganò, L. (2020). A Formal Approach to Physics-based Attacks in Cyber-physical Systems. *ACM Transactions on Privacy and Security*, *23*(1), 1–41. https://doi.org/10.1145/3373270

Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, *65*(2), 621–641. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005

Ni, Y., Guo, Z., Mo, Y., & Shi, L. (2020). On the Performance Analysis of Reset Attack in Cyber-Physical Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *65*(1), 419–425. https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2914655

Park, G., Lee, C., Shim, H., Eun, Y., & Johansson, K. H. (2019). Stealthy Adversaries Against Uncertain Cyber-Physical Systems: Threat of Robust Zero-Dynamics Attack. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *64*(12), 4907–4919. https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2903429

Rana, B., & Rathore, S. S. (2023). Industry 4.0 – Applications, challenges and opportunities in industries and academia: A review. *Materials Today: Proceedings*, *79*, 389–394. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.162

Rocchetto, M., & Tippenhauer, N. O. (2016). *On Attacker Models and Profiles for Cyber-Physical Systems* (pp. 427–449). https://doi.org/10.1007/978-3-319-45741-3_22

Teixeira, A., Shames, I., Sandberg, H., & Johansson, K. H. (2015). A secure control framework for resource-limited adversaries. *Automatica*, *51*, 135–148. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.10.067

Xu, L., Guo, Q., Sheng, Y., Muyeen, S. M., & Sun, H. (2021). On the resilience of modern power systems: A comprehensive review from the cyber-physical perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *152*, 111642. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111642

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Recent advances in sliding mode control for earthquake-resistant recovery of structures with passive isolation systems

L.O. Santos-Arrieta[1], C. Morales-Morales[1,2], X. Morales-Morales[1], A. González-Lorence[2], A. Bárcenas-Nava[1], J.G. Rodríguez Ortiz[2]

[1]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: lisandroomarsantos@gmail.com, cornelio.mm@chilpancingo.tecnm.mx

[2]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, juan.ro@sjuanrio.tecnm.mx

Abstract: This article presents a review of recent advances in Sliding Mode Control (SMC) applied to structures with Passive Isolation Systems (PIS) for structural recovery. The objective is to analyze the response of PIS systems using SMC to achieve energy balance and reach the equilibrium point, introducing the context of active and semi-active structural control to mitigate the effects of dynamic loads such as earthquakes and wind, highlighting the effectiveness and robustness of the SMC against uncertainties and disturbances, explaining the operation of PIS systems based on the partial decoupling of the structure from the ground movement. The problems of natural disasters and the need for resilient infrastructure are discussed, evidencing the reduction of vibration frequencies, reaction forces, self-centering, soil-structure decoupling and reduction of rigidity, which provide an opportunity for feasible solutions in structural recovery under structural movement conditions.

***Keywords*:** SMC, PIS, Structural Isolation, Displacement, Self-centering.

1. INTRODUCCIÓN

El control estructural activo y semiactivo ha sido objeto de un intenso desarrollo en las últimas décadas, buscando mitigar los efectos de cargas dinámicas como terremotos y viento en edificios y otras infraestructuras civiles (Ohtori et al., 2004). En estas técnicas, el control por modos deslizantes (sus siglas en inglés SMC) ha demostrado su efectividad y robustez frente a incertidumbres paramétricas y perturbaciones externas (Wani et al., 2022). En particular, su aplicación en estructuras con sistemas de aislamiento pasivo, que consisten en el desacoplamiento parcial de la estructura del movimiento del suelo, concentrando los desplazamientos en la interfaz de aislamiento y protegiendo la superestructura (Celebi, 2000). Sin embargo, su efectividad puede verse comprometida ante excitaciones intensas o impredecibles. La incorporación de SMC permite aprovechar las ventajas de estos sistemas pasivos, al mismo tiempo que proporciona una protección adicional contra respuestas indeseadas.

Las estructuras no dimensionan su exposición real al riesgo del evento sísmico o viento, Ren, et al. (2022); siendo más probable cerca del epicentro por falta de un espectro específico, Li, et al. (2021); debido a que no se considera el empuje vertical del sismo, ni la degradación de la rigidez del concreto ni del acero, Lou, et al. (2022); con posibilidad de generar un efecto cascada, Gu, et al. (2024). Este documento compara los últimos 4 años en el estado del arte, se revisaron 25 artículos con el objetivo de encontrar indicios para analizar el método de SMC, para la recuperación estructural, mediante el balance de energía y recobrar el punto de equilibrio, combinando Sistemas de Aislamiento Pasivo (sus siglas en inglés PIS).

La Figura 1, muestra la línea de tiempo de los resultados de búsqueda relacionados con el tema del control pasivo para estructuras con carga dinámica, realizado con la herramienta de inteligencia artificial *Researsch Rabbit*. En relación al tema, la figura muestra cómo se conecta el título con otros artículos a través de palabras clave, del cual, también proporciona información sobre su propia línea de tiempo.

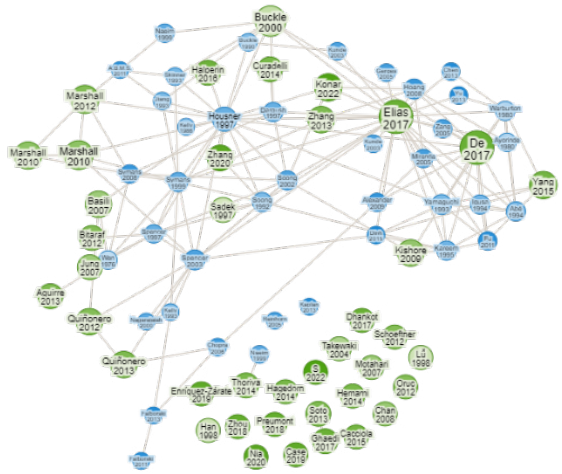


Figura 1. Búsqueda de estudios de relevancia, herramienta Researsch Rabbit (https://researchrabbitapp.com/home).

De la búsqueda y revisión del estado del arte, se analizaron las teorías e hipótesis de diseño, creación, prueba de dispositivos encontrados por métodos y modelos innovadores en busca de solución a gran diversidad de problemas, evaluando mediante la experimentación, la simulación virtual, el empleo de algoritmos de alta precisión, modelos a escala y algunas verificaciones de laboratorio.

A continuación, se presentan los resultados encontrados del desarrollo del avance tecnológico por SMC y PIS. El sistema

ISSN: 2992-8338

de aislamiento pasivo analizado en mampostería, permaneció en el rango viscoelástico logrando el autocentrado, Ali, et al. (2024); el SAP de separación de masas en fachada, redujo en 30% el desplazamiento lateral, Moeinadini, et al. (2023); el SAP de carcasas reticuladas tridimensionales para aislamiento de suelo-estructura, generó resultados prometedores y un nuevo AP suelo-estructura, Nie, et al. (2024); el PIS de base geotécnico hecho de agregado de neumático, disipó la energía y logró un autocentrado favorable, Yarahuamá & McCartney (2024).

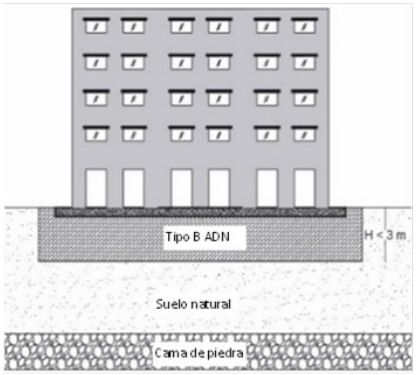


Figura 2. Sustitución de suelo por caucho TDA (Yarahuamá & McCartney 2024).

La Figura 2 presenta la base de una estructura soportada por un agregado sintético elaborado de llanta reciclada, formando una base geotécnica artificial para disipar la energía en la interacción suelo-estructura. La Figura 3a ilustra un bucle histerético para el ciclo con la relación de amortiguación más alta, el esquema considera la relación de autocentrado, se representa el diagrama del límite elástico, la zona de histéresis, el eje x muestra la relación de autocentrado, el eje y representa la disipación de energía. La Figura 3b, presenta la correlación de resiliencia, la zona 1 indica bajas capacidades para disipar energía, la zona 2 representa la zona de disipación de energía, la zona 3 es la zona propensa a volverse a centrar con alta capacidad de rearmado y baja disipación de energía, la zona 4 representa los sistemas óptimos de resistencia sísmica. Estos esquemas son presentados debido a que pueden ser de relevancia al momento de la búsqueda de la recuperación estructural, mediante el balance de energía y recobrar el punto de equilibrio por el SMC.

El PIS de la estructura de aislamiento sísmico de fondo de pila autocentrado de los puentes de estructura rígida continúa de pila alta, en condiciones de aislamiento sísmico, resultó exitosa la disipación de energía en la base y logró el autocentrado, Zhang, et al. (2023); el estudio sobre el comportamiento sísmico de un soporte amortiguador cilíndrico de acero integrado para varios PIS, funcionó como disipador de energía y barra de tracción formada para limitar el desplazamiento, Liu, et al. (2023).

La evaluación del desempeño del PIS sísmico por oscilación de pilares altos de una línea de ferrocarril, funcionó con tirantes restringidos a pandeo y logró el autocentrado, Nie, et al. (2023); la vibración no lineal controlada por SMC, da fe de la eficiencia del controlador, Mesny, et al. (2024); y la discretización de tiempo implícita de Euler de controladores de SMC multivariable, conduce a una implementación digital sin vibraciones, Mojallizadeh, et al. (2024).

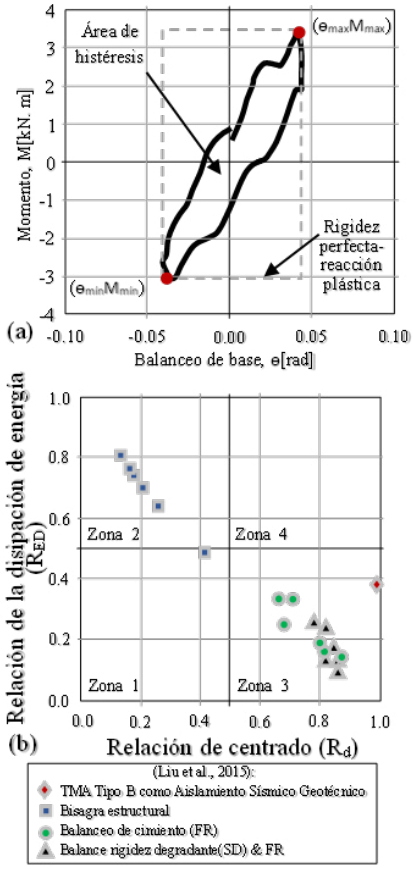


Figura 3: a) Bucle histérico; b) Diagrama de correlación de resiliencia.

2. PROBLEMÁTICA

Según reportes de *The International Disaster Database* (EM-DAT, 2022) se registraron 387 desastres naturales en todo el mundo, afectando a 185 millones de damnificados y causando 30,704 millones de muertes, Havva, et al. (2024). La fuerza devastadora de los sismos y huracanes genera enormes daños en la infraestructura global, derivando a menudo a catástrofe en cascada que acumula efectos secundarios, como la generación de basura y escombro que impactan al medio ambiente, Gu, et al. (2024). La reconstrucción incide negativamente, dado que esta industria emite 33% de los gases de efecto invernadero, Liu, et al. (2021), 28% de emisiones mundiales de CO2, He, et al. (2021). La forma de afrontar esta problemática es generar sociedades e infraestructura resiliente con la implementación de control por modos deslizantes y control pasivo para la recuperación estructural, mediante el balance de energía.

Una de las medidas abordadas en el diseño estructural para mejorar las capacidades de respuesta a las acciones dinámicas ha sido incorporar mayor rigidez a los diseños. Esto supone que la base de la estructura aporta una rigidez infinita, situación que exige el empleo a fondo de las propiedades mecánicas de la estructura bajo cargas dinámicas extraordinarias. Por lo tanto, el reto consiste en afrontar la sobredemanda sísmica y de viento, suprimir la energía transmitida a la estructura, disminuir los sobreesfuerzos y la

ISSN: 2992-8338

vibración, manteniendo la capacidad elástica mediante el sistema de control por modos deslizantes y el control pasivo.

Algunos investigadores han abordado esta problemática implementando sistemas de control pasivo para disipar la energía, disminuir la frecuencia oscilante, desacoplar el período del suelo con el período fundamental de la estructura, disminuir la fuerza de inercia, proporcionar movimiento articular, disminuir la rigidez y la energía transmitida a la estructura mediante sistemas de respuesta lineal y no lineal con una amplia gama de materiales y técnicas innovadoras, desde simples almohadillas de caucho hasta materiales superelásticos con memoria de forma o la levitación magnética.

La evolución del empleo de estos dispositivos es enorme. Sus inicios datan de la viga de Euler para el análisis carga-deformación. Bajo ese mismo principio, se han desarrollado dispositivos experimentales en busca de autocentrado mediante métodos pasivos, semi pasivos y activos. Hasta llegar al sofisticado método de control por modos deslizantes, que aún está en pruebas de laboratorio debido al gran potencial que puede desarrollar para afrontar el control de los eventos catastróficos o incluso su empleo en la industria espacial para el desarrollo de nuevos hábitats. Esto requeriría un largo tiempo de exploración y una explicación de los fenómenos generadores de las perturbaciones dinámicas propias del sitio.

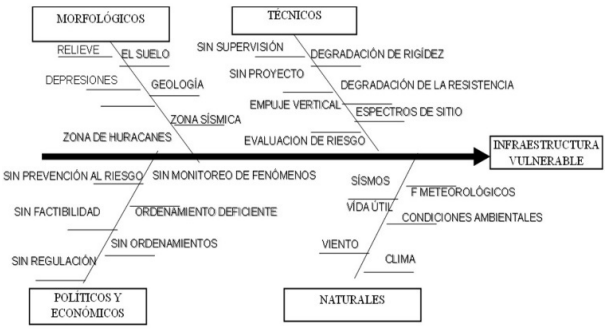


Figura 4. Diagrama de Ishikawa causa-efecto.

En la Figura 4, se muestra el diagrama de causa y efecto de Ishikawa, el problema representa la hipótesis sobre las causas que la formulan, las cuales están representadas en cuatro dimensiones: causas técnicas, causas naturales, causas morfológicas y causas político-económicas, donde cada una de estas dimensiones reúne varias subcausas que conducen al problema.

3. MOTIVACIÓN

Encontrar evidencias que apoyen la generación de soluciones tendientes a mejorar el control de disgregación de las vibraciones en la estructura con el SMC para preservar y alargar el período de vida útil del módulo de elasticidad, con esto, evitar la degradación por rigidez debido al sometimiento a efectos constantes o duraderos de las sobrecargas dinámicas que provoca daños irreparables.

Este enfoque se ve motivado por la preservación y el mantenimiento preventivo, impulsados por el avance tecnológico y la generación de nuevos métodos. Uno de estos métodos es la implementación de sistemas de control por modos deslizantes, que pueden contribuir a la recuperación estructural y a la resiliencia estructural, a su vez, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero contribuyendo a un futuro sostenible y con impacto positivo al medio ambiente.

Los modos deslizantes es un método que tiene la capacidad de calcular la magnitud de un sistema contra perturbaciones y variaciones de parámetros impredecibles, tomarlo en un plano de recuperación y llevarlo a su estado inicial de arranque, proporciona una solución directa para la entrada de control y de acuerdo a Utkin, (1977); es el movimiento a lo largo de una línea que no es una trayectoria de ninguna de las estructuras; según Velásquez (2013); es una alternativa robusta y novedosa para tomar el control de sistemas no lineales; para Pérez & García (2018); es un procedimiento que suministra un medio directo para la entrada de control; para Cornelies (2014); consiste en el uso de operaciones conmutadas o discontinuas sobre una o varias superficies de conmutación y De la Cruz & Camacho, (2015); lo definen como una técnica derivada del control de estructura variable que consiste en definir una superficie a lo largo de la cual el proceso pueda deslizarse hacia su valor final deseado.

El estudio de los SMC se ha convertido en una apasionante búsqueda de soluciones ante la respuesta sísmica, dichas soluciones se pretenden encauzar al estudio por el enfoque del control deslizante, ya que como se puede observar el *quid* de la tecnología de aislamiento sísmico radica en el desarrollo efectivo de nuevos dispositivos de aislamiento sísmico que puedan controlar la respuesta dinámica de la estructura, por lo que en este estudio se propone reducir el impacto de las cargas sísmicas, mitigar los riesgos de daño sísmico, reducir las fuerzas de inercia y las tensiones en la estructura para prolongar la vida útil y reducir los costos de conservación y mantenimiento.

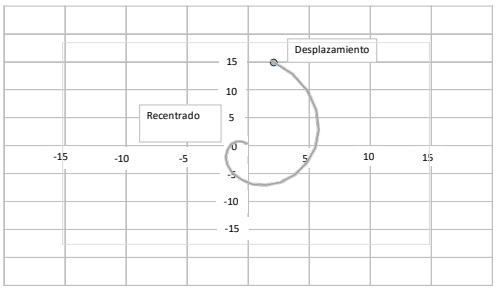


Figura 5. Recuperación del desplazamiento con efecto oscilatorio.

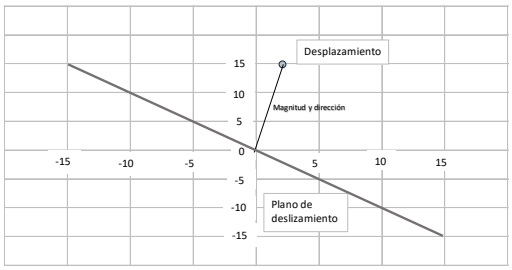


Figura 6. Superficie de Control Deslizante.

La Figura 5 presenta el recorrido del desplazamiento tras el movimiento de manera asintótica hacia el origen. Por otro lado, la Figura 6 muestra el plano de la superficie del deslizamiento. Estos elementos son cruciales para comprender y diseñar sistemas de control por modo deslizante y que

ISSN: 2992-8338

contribuyan a la recuperación estructural para dar paso a la resiliencia estructural.

4. RESULTADOS

Los estudios demuestran indicios del avance tecnológico para delimitar los esfuerzos inducidos por las cargas extraordinarias que generan el viento y el sismo mediante la estimación de actuación por modos deslizantes. Esto se presenta manteniendo intactas las propiedades elásticas de la estructura y evitando la presencia de sobreesfuerzos más allá del límite elástico.

Con base en la revisión bibliográfica se encontraron datos reveladores que indican disminución de la frecuencia vibratoria, disminución de las fuerzas de reacción, desacoplamiento del suelo-estructura y disminución de rigidez, mediante sistemas pasivos, donde dan evidencia del uso del control sobre estructuras no lineales por modos deslizantes.

Los resultados de Li et al., (2021); del estudio de parámetros de entrada de energía sísmica para el diseño del aislamiento estructural utilizando el método de balance de energía bajo movimiento del terreno cercano a la falla, muestra que los espectros de diseño sísmico basados en movimiento del suelo convencional no son adecuados para el sitio cercano a la falla. La imprecisión de parámetros de entrada al sitio cercano a la falla resulta una desventaja por el desconocimiento de la magnitud de la reacción requerida. Dos años más tarde, Li et al., (2023); analizó un modelo a escala 1/3 probado en mesa vibratoria para revelar el mecanismo de control de vibración multidireccional del aislamiento en la base, la ventaja del enfoque estriba en reducir la energía transmitida a la estructura tanto en la dirección horizontal como en la vertical, utilizando un amortiguador de acero como barra de tracción. La desventaja observada es la restricción de movimiento del plano de deslizamiento. Los avances de un año anterior de Lou et al., (2022); al analizar el comportamiento de un centro de transporte elevado con procedimientos del código de construcción ASCE/SEI 7-16 contra el código GB50011-2010 con un modelo de elementos finitos considerando la degradación de la rigidez y las 6 ondas sísmicas más fuertes. Se mostró que el código ASCE/SEI 7-16 presenta una ventaja de desempeño al mejorar sus capacidades con el aislamiento sísmico. El mismo año Zou et al., (2022); analizó un dispositivo de aislamiento sísmico de separación funcional (FSID) reemplazable con pruebas de carga de campo a escala real, el resultado mostró que el muelle de PC representa una ventaja al restaurarse a su posición inicial después de un terremoto debido a la pretensión. El balanceo excesivo es una desventaja ya que puede llevar al volteo.

Un año después Liu et al., (2023); analizó la introducción del cojinete amortiguador de acero cilíndrico integrado funcional (FICSDB), con el objetivo de desarrollar un dispositivo integrado que combina amortiguadores de acero y cojinetes de aislamiento de acero en forma de C y E, se colocaron amortiguadores cilíndricos de acero simétricamente a ambos lados de la dirección de deslizamiento del rodamiento. El resultado mostró que el amortiguador de acero funcionó como una barra de tracción, siendo una ventaja para limitar el desplazamiento. La desventaja es que requiere precisión el cálculo de la dirección del plano de deslizamiento. En otro orden de ideas Nie et al., (2023); evaluó el desempeño de 5 dispositivos de disipación de energía (EDD), con diseño paramétrico estático y dinámico, para restringir la parte inferior de una pila de balanceo libre (F-RP), utilizó tirantes restringidos a pandeo (BRB), cables de acero elásticos (YSC), tirantes restringidos a pandeo auto centrados (SC-BRB), alambres de aleación super elásticos con memoria de forma (SMA) y amortiguadores viscosos (VD), la ventaja de incorporar los tirantes restringidos a pandeo SC-BRB y los alambres de aleación super elásticos con memoria SMA, es que, no requieren reparación después de un terremoto, la desventaja en esta comparación fue que las medidas convencionales de aislación no reducen la fuerza de inercia.

Al mismo tiempo He et al., (2023); estimó los parámetros de varios dispositivos en sistemas de control sísmico para evaluar la respuesta máxima en la capa de aislamiento para cojinetes de caucho laminado, amortiguadores de aceite y cojinetes deslizantes elásticos, utilizando un filtro Kalman en una mesa vibratoria, los resultados mostraron fluctuaciones con la ocurrencia de múltiples golpes, la rigidez estimada de los cojinetes de caucho y el coeficiente de amortiguación de los amortiguadores de aceite tienden a aumentar, mientras que el coeficiente de fricción estimado de los cojinetes deslizantes elásticos permanece casi sin cambios. La ventaja obtenida de este último es que los parámetros estimados comienzan a converger a los valores de referencia después de casi 25 s. La desventaja encontrada es que en esta prueba no se encontraron desplazamientos laterales.

En cuanto a la experimentación, Wang et al., (2023); investigó 4 casos diferentes con paneles de revestimiento de disipación de energía (EDCP) (RCFSW7- D), edificio aislado (RCFSW7-I), edificio aislado con rigidez mejorada de la superestructura (RCFSW7.5-I) y edificio de control híbrido que utiliza EDCP y aislamiento (RCFSW7-H). Se analizaron el control de vibraciones y las respuestas sísmicas críticas a la resiliencia sísmica con aislamiento y amortiguación con muros de corte de hormigón armado (RC). Las relaciones máximas de desplazamiento entre pisos (MIDR) de RCFSW7-I, RCFSW7.5-I y RCFSW7-H bajo el terremoto máximo considerado fueron 36%, 51% y 72% más bajas que las de RCFSW7-D. Aunque la rigidez de la superestructura de RCFSW7.5-I y RCFSW7-H era aproximadamente idéntica, la MIDR de RCFSW7-H era un 44 % más pequeña que la de RCFSW7.5-I. Mientras tanto, las aceleraciones máximas absolutas del piso (MAFA) de tres estructuras aisladas bajo MCE fueron aproximadamente un 70% más bajas que las del RCFSW7-D.

Con respecto a la exploración, Zhang et al., (2023); estudió la estructura de aislamiento sísmico autocentrante de fondo de pila con aislamiento de superficie de contacto plana y esférica utilizando un modelo de elementos finitos ABAQUS, los resultados mostraron la ventaja del aislamiento sísmico del pilote con una capacidad de disipación de energía y ductilidad, para una relación entre los radios del eje largo y del eje corto de 1,5 y 2.0, y una altura entre 60 y 100 m, el muelle de aislamiento sísmico presenta autocentrado. A estas investigaciones se suma Jin et al., (2023); con el análisis de un nuevo tipo de unión viga-columna mediante una simulación numérica con elementos finitos para disipación de energía de sacrificio (SEDJ), los resultados indican que la reducción adecuada y activa del límite elástico posterior del SEDJ, con F r / F u igual a 0,3, proporciona el efecto más favorable para

ISSN: 2992-8338

mejorar la distribución de energía de disipación plástica de los componentes de vigas y columnas, la ventaja de este análisis es reducir el daño a la columna inferior bajo fuertes terremotos, la desventaja se presenta en el disipador de energía de sacrificio (SEDJ) ya que se debilitó activamente por la falla por corte en los pernos durante un sismo fuerte. En cuanto al análisis del aislamiento para separar la estructura del movimiento horizontal del suelo (Bantilas et al., 2023); examinó un aislamiento cinemático con un modelo analítico ante el comportamiento sísmico de cojinetes cinemáticos cóncavos suficientemente delgados y rigidez positiva post-levantamiento, amortiguadores viscosos suplementarios, las ventajas muestran que a medida que aumenta la esbeltez de las columnas oscilantes, la aceleración del suelo requerida para levantar el piso cinemático disminuye, lo que genera menores demandas sísmicas, la desventaja de este sistema es determinar eficazmente el plano de deslizamiento.

En otro orden de enfoques Zhao et al., (2023); estudió el aislamiento sísmico y disipación de energía para la estructura aislada sobre el suelo basada en rigidez negativa con una estructura subterránea, utilizando un método de simulación, los resultados obtenidos deducen que las estructuras aéreas o grupo estructural pueden causar efectos inerciales adicionales impuestos sobre la estructura subterránea, fortaleciendo simultáneamente la rigidez del suelo por su tipo de pilotes o cimentaciones profundamente enterradas. La rigidez negativa le proporciona la ventaja de poder aislar las vibraciones prolongando el período estructural dominante tanto en la dirección vertical como en la horizontal, la desventaja es que las estructuras subterráneas pueden interrumpir la ruta de propagación sísmica original. Otro punto relevante es el abordado por Moeinadini et al., (2023); para el aislamiento de fachadas (FI) en diseño sísmico con modelos lineales elásticos de doble masa en una configuración simplificada utilizando el método de aislamiento de masa parcial (PMI), para mejorar el rendimiento dinámico de los edificios, la ventaja de este método son la disminución de los desplazamientos laterales del marco de la fachada en el edificio aislado que se redujo 1/3, mientras que también se redujeron la fuerza lateral del sistema estructural principal, la desventaja es que este análisis se centra en la masa de la estructura como el principal objetivo del aislamiento. Por otro lado, Hu et al., (2023); analizó un sistema no lineal asistido por rigidez negativa para edificios adyacentes no coaxiales con un método de análisis paramétrico empleando aisladores y sistemas de amplificación de rigidez negativa con amortiguadores viscosos y cojinetes de fricción, el resultado mostró la desventaja del efecto de torsión en edificios adyacentes no coaxiales que resulta en un problema dominante, y la ventaja de este método es el acoplamiento de estructuras adyacentes con dispositivos de control suplementarios para transferir la fuerza de reacción de una estructura a la otra.

Entre los resultados encontrados este año se encuentran los de (Zhang et al., 2024); dónde se investigó el comportamiento sísmico de una novedosa estructura de aislamiento de marco RC totalmente prefabricada con conexión seca, en un modelo a escala y ensayado en mesa vibratoria, los resultados exponen la ventaja que ante un terremoto raro, la capa de aislamiento no le trasfirió daños, por lo que la estructura permaneció intacta, la desventaja observada es que ante terremotos altos, se presenta aparición de grietas y deformación de los cojinetes de aislamiento, lo que induce a una reparación o pérdida total. En el estudio de estructuras de madera, Dang et al., (2024); realizó un estudio experimental del comportamiento sísmico a una junta disipadora de energía para estructuras de madera, los resultados mostraron que, al inicio, los elementos de disipación de energía comienzan a ceder y disipar energía, y en el punto final, los elementos de disipación de energía salen del estado de funcionamiento. La ventaja encontrada es que agregar refuerzos basados en el método de conexión de mortaja y espiga pueden proporcionar múltiples líneas de defensa sísmica y la desventaja es el mantenimiento para el cambio de la junta.

Por otro lado, la investigación de Ali et al., (2024); del experimento a un sistema de aislamiento deslizante en una mesa vibratoria con funciones de recentrado para la protección sísmica de estructuras de mampostería llamado pared corta, realizado para dos edificios de mampostería de ladrillo no confinados a escala reducida (1:3) sometidos a excitación sísmica, muestran que la aceleración absoluta de los modelos disminuyó inicialmente con el aumento gradual del coeficiente de fricción de la interfaz y, en algún momento, se obtuvo un valor mínimo de la aceleración, la ventaja estriba en que es un aislamiento de bajo costo con un mecanismo de recentrado apropiado, la desventaja radica en que se trata de un sistema de fricción de capa de aislamiento entre 0,15 y 0,35. También se desarrollaron otros enfoques por Nie et al., (2024); se analizaron 7 modelos a escala reducida de una estructura en mesa vibratoria, con sensores de aceleración, tensión y desplazamiento para un cojinete tridimensional para probar sus características dinámicas y su rendimiento ante el aislamiento sísmico, los resultados mostraron un mejor rendimiento general de aislamiento sísmico, en comparación con los otros 6 cojinetes, el aislamiento tridimensional adquiere la ventaja de ser superior y más eficiente al aislamiento sísmico en comparación con otros esquemas.

Otra de las novedades es la de Yarahuamá & McCartney (2024); realizaron pruebas en mesa vibratoria unidireccional de una superestructura de un solo grado de libertad conectada a una zapata de hormigón de 0,46 m de profundidad incrustada dentro de una capa de agregado derivado de neumático TDA de 1,89 m de espesor dentro de una caja laminada, sometida a una serie de movimientos de barrido sinusoidal con amplitudes y frecuencias variables entre 0,4 y 10 Hz. Los resultados muestran las ventajas de la disipación de energía y un centrado favorable con un índice de rearranque residual promedio de 0,991, como desventaja se observó una no linealidad en la respuesta de la zapata al momento del balanceo, la rigidez de balanceo se ablandó ligeramente por debajo de su capacidad y se presentó asentamiento transitorio moderado.

En relación al Modo deslizante Xing et al., (2024); construyó la función de conmutación que incluye efectos impulsivos, y es continua a lo largo de los estados del sistema, mediante ecuaciones diferenciales parciales retardadas (PDE) del control de modo deslizante distribuido (SMC) mediante el método de desigualdad matricial lineal directa (DLIM) con información de impulso periódico y términos de reacción-difusión (RDT) se analizó la estabilidad exponencial del movimiento deslizante. Los resultados mostraron que la estrategia SMC distribuida propuesta representa una ventaja al eliminar los efectos impulsivos al inducir el estado de circuito cerrado a un colector deslizante específico en un tiempo

ISSN: 2992-8338

limitado. La desventaja de este análisis es que no está enfocado a un mecanismo específico de actuación. Además, Mojallizadeh et al., (2024); estudió una planta de tiempo continuo con múltiples entradas bajo un control de modo deslizante multivariable y mediante un algoritmo, desarrolla la discretización temporal implícita de Euler de controladores multivariables de modo deslizante para resolver el problema de vibración numérica sin modificar la ley de control de tiempo continuo. La ventaja de este enfoque radica en la implementación del algoritmo propuesto para una implementación digital sin vibraciones. La desventaja es que no se ha probado en un modelo real.

Por otro lado Zhang et al., (2024), analizó un controlador robusto adaptativo integrado, llamado controlador integral de tiempo finito de modo deslizante con un observador de estado extendido integrado (ISFC-IESO) para sistemas no lineales, el modelo es un vector de estado, la ventaja es que se puede medir y considerar las perturbaciones concentradas, causadas por características dinámicas no lineales o de acoplamiento inherentes a un sistema práctico, los resultados evidenciaron esta ventaja con una unidad de Control de Modo Deslizante Integral (ISMC) mediante la combinación de Control Activo de Rechazo de Perturbaciones (ADRC y SMC) ya que mejora eficazmente el rendimiento dinámico y la estabilidad. La desventaja es determinar con exactitud las perturbaciones. Así mismo Mesny et al., (2024); estudió la combinación de un sistema no lineal y un controlador robusto de modo deslizante con superficie integral deslizante para controlar la vibración no lineal de una estructura por modo deslizante con un algoritmo original basado en el método del balance armónico capaz de calcular directamente las soluciones periódicas, los resultados han realizado validaciones experimentales sobre una estructura no lineal, otorgando la ventaja de la eficiencia del controlador propuesto y de la robustez de las herramientas numéricas propuestas, la desventaja es seleccionar la ley de control adecuada para lograr el comportamiento deseado.

5. DISCUSIÓN

Los indicios para implementar el sistema de control por modos deslizantes cuentan con amplia evidencia que permite considerar un análisis para tendencias futuras en la recuperabilidad estructural. Los resultados de esta revisión del estado del arte desde el punto de vista de la ingeniería, muestran avances tecnológicos significativos en métodos de análisis, materiales, modelado matemático y físico de los sistemas pasivos utilizados para recuperar el autocentrado. Por lo tanto, la discusión se centra en la pertinencia de introducir el método de los modos deslizantes en las grandes estructuras derivado de su gran peso y tamaño. Esto se debe a la poca investigación en la materia o la falta de armonización de los dispositivos con el modo de control. Sin embargo, se vive una oleada de avances tecnológicos innovadores traducidos en materiales y dispositivos que abren un nicho de oportunidad para este método.

6. CONCLUSIONES

La revisión de los avances recientes del SMC permite visualizar áreas de oportunidad que brinden soluciones factibles para recuperación estructural, mediante el balance de energía y recobrar el punto de equilibrio mediante sistemas pasivos que supriman o reduzcan las distorsiones del movimiento. Esto será posible utilizando SMC-PIS articular, cuyo objetivo es suprimir en un rango superior al 30% la energía transmitida al sistema estructural y limitar la capacidad elástica hasta un 80%.

Finalmente, se deduce que los resultados son favorables y prometedores, esperando formar parte de los métodos constructivos tradicionales del futuro y que en el corto plazo sean considerados en los diferentes ordenamientos constructivos que servirá a los expertos para la reparabilidad en la construcción y preservación estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, A., Zhang, C., Bibi, T., & Sun, L. (2024, February). Experimental investigation of sliding-based isolation system with re-centering functions for seismic protection of masonry structures. In Structures (Vol. 60, p. 105871). Elsevier.

Bantilas, K. E., Kavvadias, I. E., & Elenas, A. (2023). Analytical modeling and seismic performance of a novel energy dissipative kinematic isolation for building structures. Engineering Structures, 294, 116777.

Dang, D., Yuan, K., Liu, Y., & Liu, Y. (2024). Experimental study on seismic performance of timber frame with novel energy-dissipation joints. Engineering Structures, 300, 117137.

He, X., Li, D., & Unjoh, S. (2023). Joint state–parameter estimation for structures with seismic isolation and damping systems: Theoretical observability and experimental verification. Mechanical Systems and Signal Processing, 203, 110733.

Hu, X., Zhao, Z., Zhang, R., Yang, K., Chen, Q., & Weng, D. (2023). Seismic resilient design and negative stiffness-assisted nonlinear isolation system for adjacent non-coaxial buildings linked by corridors. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 175, 108227.

Jara, J. M., Hernández, E. J., & Olmos, B. A. (2021). Effect of epicentral distance on the applicability of base isolation and energy dissipation systems to improve seismic behavior of RC buildings. Engineering Structures, 230, 111727.

Jin, X., Liao, W., Tian, Y., Xie, L., & Lu, X. (2023). Numerical simulation and seismic performance analysis of sacrificial-energy dissipation beam-column joint. Engineering Structures, 296, 116979.

Li, J., Luo, W., Liang, Q., Wang, D., Zhou, Y., & He, Z. (2023). Shaking table test of seismic performance of high-rise over-track building with base isolation. Journal of Building Engineering, 75, 106749.

Li, Y., Li, C., & Zhao, G. H. (2021). Seismic isolation design for simply-supported beam bridges based on the energy balance method under near-fault ground motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 145, 106730.

Liu, M., Gao, H., Wang, J., Huang, Y., & Dong, Z. (2023, October). Study on seismic performance of functionally integrated cylindrical steel damper bearing with energy dissipation and spacing. In Structures (Vol. 56, p. 104963). Elsevier.

Lou, X., Huang, Y., Lv, Y., & Huang, Q. (2022). Seismic performance of the series seismic isolation systems designed by the procedures of GB50011-2010 and ASCE/SEI 7-16. Case Studies in Construction Materials, 17, e01184.

Mesny, L., Baguet, S., & Chesné, S. (2024). Nonlinear vibration of a sliding-mode-controlled structure: Simulation and experiment. Mechanical Systems and Signal Processing, 211, 111209.

Mojallizadeh, M. R., Bonnefoy, F., Plestan, F., Hamida, M. A., & Ohana, J. (2024). Euler implicit time-discretization of multivariable sliding-mode controllers. ISA transactions.

Moeinadini, A., Ziyaeifar, M., & Nekooei, M. (2023, December). Facade isolation in seismic design of tall buildings. In Structures (Vol. 58, p. 105416). Elsevier.

Nie, G. B., Wang, W., Zhang, C. X., Zhi, X. D., & Liu, K. (2024). Seismic evaluation of isolation performance on single layer cylindrical reticulated shells supported along four sides. Engineering Structures, 301, 117279.

Nie, L., Jiang, L., Zhou, W., Wu, X., Dong, J., & Yu, J. (2023, October). Evaluation of rocking seismic isolation performance of railway tall piers with different energy dissipation devices. In Structures (Vol. 56, p. 104923). Elsevier.

Ohtori, Y., Christenson, R. E., Spencer, B. F., & Dyke, S. J. (2004). Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. Journal of Engineering Mechanics, 130(4), 366-385.

ISSN: 2992-8338

Wang, X., Xie, L., & Liu, Q. (2023, December). Comparison on seismic resilience of hybrid, isolation, and damping control reinforced concrete frame-shear wall buildings. In Structures (Vol. 58, p. 105481). Elsevier.

Wani, Z. R., Tantray, M., Farsangi, E. N., Nikitas, N., Noori, M., Samali, B., & Yang, T. Y. (2022). A critical review on control strategies for structural vibration control. Annual Reviews in Control, 54, 103-124.

Xing, H., Kao, Y., Wang, G., & Li, F. (2024). Distributed sliding mode control for a class of impulsive uncertain delayed partial differential equations via sliding mode compensator approach. European Journal of Control, 100984.

Yarahuaman, A. A., & McCartney, J. S. (2024). Full-scale seismic response test on a shallow foundation embedded in tire-derived aggregate for geotechnical seismic isolation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 177, 108417.

Zhang, R., Guo, T., Qiu, W., Wu, Y., & Li, A. (2024, January). Research on seismic performance of a novel fully precast RC frame isolation structure. In Structures (Vol. 59, p. 105750). Elsevier.

Zhang, W., Liu, Y., Chen, Y., & Du, X. (2023). Study on the pier bottom self-centering seismic isolation structure of the high-pier continuous rigid frame bridges. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 174, 108189.

Zhang, Z., Guo, Y., Zhu, S., Liu, J., & Gong, D. (2024). Adaptive integral sliding-mode finite-time control with integrated extended state observer for uncertain nonlinear systems. Information Sciences, 667, 120456.

Zhao, Z., Wang, Y., Chen, Q., Qiang, H., & Hong, N. (2023). Enhanced seismic isolation and energy dissipation approach for the aboveground negative-stiffness-based isolated structure with an underground structure. Tunnelling and Underground Space Technology, 134, 105019.

Zou, S., Wenliuhan, H., Liu, Y., Yang, Z., Zhang, C., & Yuan, L. (2022). Seismic isolation technology for prestressed segmental precast piers. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 161, 107362.

ISSN: 2992-8338

Una Propuesta para Definir la Granularidad de los Servicios Web de Aprendizaje

Sócrates Benítez*. Olivia G. Fragoso.* Juan C. Rojas*

**Tecnológico Nacional de México/Cenidet, Cuernavaca, Morelos,62490 México (e-mail: d16ce073, olivia.fd, juan.rp@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: This document proposes a way to define the granularity of learning resources that are shared through Web services from either the data volume or size approach. This study suggests to creators of learning content or learning resources how to define their resources based on a reasonable or adequate computational volume, so that they can be more reusable and can be shared, delivered and deployed as Web services with minimal computational requirements. The analysis of different studies and the results of the tests allow us to validate this proposal.

Keywords: Granularity, Learning Resources, Learning Web Services, Reusability.

1. INTRODUCCIÓN

Los servicios Web de aprendizaje (SWA) se han definido como una forma de compartir contenido educativo, en estos SWA el recurso de aprendizaje (RA) está contenido internamente y es entregado en respuesta a una solicitud. El RA vive dentro del SWA como una cadena de caracteres codificado en BASE64, y esta codificación aumenta el tamaño del recurso en 33 por ciento; esto quiere decir que un recurso de 1MB aumenta a 1.33MB. En pruebas preliminares realizadas en Cenidet se ha detectado que el volumen o tamaño del recurso causa estragos computacionales cuando se solicitan SWA con RA mayores de 3MB. La infraestructura utilizada para desplegar SWA requiere ciertas características y ciertos parámetros de configuración que permitan su buen desempeño, uno de estos parámetros es el tamaño de la Java Heap Space (JHS), el cual es el espacio en memoria donde se generan los objetos de java y utiliza dos parámetros que se deben considerar previo al despliegue de las aplicaciones. Uno de los parámetros es el parámetro XMX, el cual indica el volumen máximo que debe de utilizar la aplicación y el otro es el parámetro XMS, este indica cuando el almacenamiento en memoria rebase dicho parámetro, se iniciara el proceso de eliminación de los objetos no instanciados de la aplicación por parte de Garbage Collector (GC).

Atender solicitudes simultaneas o concurrentes puede causar que estas solicitudes no sean respondidas o puede llegar a colapsar a las aplicaciones que mantienen desplegados los SWA, lo que sería un fracaso para los propósitos de la enseñanza. Definir la granularidad correcta de los RA permite incrementar el éxito de las plataformas de servicios Web (WS) en ambientes de aprendizaje electrónico(E-Learning), por lo que es importante que los creadores de contenido educativo sean conscientes a la hora de crear dichos recursos.

.

2. ANTECEDENTES

2.1 Granularidad

El término de granularidad se utiliza en muchas áreas de la informática como en la ingeniería de software, en la recuperación de información y en la computación paralela, y de acuerdo con Liu et al. (2014), granularidad es la medida promedio del tamaño particular. Otra definición de granularidad la menciona Erl (2005) e indica que la granularidad de los datos se refiere al volumen de datos intercambiados por una capacidad de servicio. En Fielding (2000) se menciona que la granularidad de datos gruesa tiende a dar como resultado que se transmitan más datos a lo largo de una instancia de composición de tiempo de ejecución promedio. Una definición de granularidad en términos de microservicios se menciona en Merino-Ibáñez (2023) e indica que esta se debe abordar de acuerdo a las funcionalidades a desarrollar en un sistema y en el tamaño adecuado de sus funciones. Además, se indica que se debe definir objetivamente el tamaño de la granularidad debido a que repercute en el valor final del servicio, precisamente en atributos como performance, confiabilidad, escalabilidad, mantenibilidad, y complejidad.

2.2 Objeto de Aprendizaje

En el enfoque pedagógico, los recursos digitales de aprendizaje están definidos como objetos de aprendizaje. En Polsani (2003) se describe que los objetos de aprendizaje están conformados en tres elementos: objetivo, actividad de aprendizaje y evaluación, además de los metadatos. El trabajo de Muñoz Arteaga et al. (2007) complementa la estructura del objeto de aprendizaje agregando un elemento más, este se define como “contenido” y se muestra en la figura 1.

En Wisconsin Online Resource Center (2005), se menciona que los objetos de aprendizaje son lo suficientemente pequeños como para integrarlos en una actividad, lección, unidad o curso de aprendizaje. En Muñoz Arteaga et al. (2006) se menciona que un recurso de aprendizaje se define como

ISSN: 2992-8338

cualquier entidad que puede usarse, reutilizarse o referenciarse durante el aprendizaje con soporte tecnológico. En términos de volumen de información, los SWA tienen ciertas limitantes para ser desplegados y la fecha no se conoce o no se ha definido el tamaño, es decir, que tan pequeños o que tan grandes deben de ser, ni cuales deben de ser los criterios a incluir a la hora de la construcción de los SWA para que puedan ser desplegados considerando aspectos computacionales.



Figura 1. Estructura de un Objeto de Aprendizaje de Muñoz Arteaga et al., (2007).

3. GRANULARIDAD DE LOS SERVICIOS WEB DE APRENDIZAJE

La granularidad de los RA para propósito de este trabajo se establece en dos perspectivas:

1. Tamaño del Recurso. En el trabajo antecedente de Fuentes Chab (2019) se propone la segmentación o división del RA de manera que permitan manipular el recurso en términos computacionales (memoria, procesamiento, latencia, ancho de banda).
2. Segmentación del RA a partir del contenido, considerando aspectos de usabilidad del recurso para manipular y visualizar de una manera más fácil y sencilla se propone que los RA´s se dividan de acuerdo con los temas, capítulos, objetivos, actividades, etc., de esta manera permite al usuario desplegar, manipular, reproducir y/o visualizar RA de una mejor manera. De esta forma, el servidor también es beneficiado porque puede procesar más rápido la respuesta a una solicitud, además que se utilizan menos recursos computacionales.

3.1 Formato de los Recursos de Aprendizaje

Es importante establecer los tipos de RA que se deben utilizar en un marco cliente para que puedan ser visualizados y utilizados para el aprendizaje. Por ejemplo en un RA de tipo audio es muy común la utilización del formato MP3, sin embargo, también existe el formato WMA. Este último formato no se podría utilizar en un equipo cliente con un sistema operativo diferente a Windows, a menos que previamente se instalen los códecs adecuados que permitan su reproducción. En Wisconsin Online Resource Center (2005), se definen algunos tipos de RA, por ejemplo evaluaciones, animaciones, simulaciones, casos de estudio, ejercicios y prácticas, plantillas. Por otro lado, en el diseño instruccional proponen diferentes tipos de RA como: texto, imágenes, diapositivas, video, audio, páginas Web, entre otros. Por lo que es importante unificar los formatos de los RA para que los clientes cuenten con los recursos computacionales para poder visualizarlos y reproducirlos.

3.2 Resolución de *Recursos de Aprendizaje*

Otra aspecto a considerar de los RA, es la resolución del formato de video y audio, por ejemplo, definir los formatos de salida adecuados para los diferentes dispositivos que se pueden utilizar para esta finalidad. Es el caso del formato de video para celular, que sin problema se puede visualizar un formato de 720p a diferencia de una computadora que puede reproducir formatos más altos, como el 1080p o 1920p. Otro ejemplo es el objetivo del RA, tal es el caso de una clase de un idioma extranjero, la calidad de un RA de tipo audio puede interferir en el aprendizaje, sin embargo, queda a responsabilidad del creador de RA´s definir estos detalles.

3.2 Granularidad de Videos

En el análisis de la granularidad de RA de tipo video, en Google Inc. (2020) se menciona que la plataforma de videos YouTube transcodifica automáticamente su video para crear muchos formatos de salida diferentes para que todos sus espectadores en muchos dispositivos y redes puedan visualizar estos videos. En estos casos, los formatos y la resolución definen el tamaño del RA, por lo que para los formatos de tipo video quedan definidos como granularidad por tamaño como se plantea en la tabla 1. Las resoluciones definidas como 480p, 720p y 1080p son los más recomendables para RA´s de video que puedan ser utilizados en ambientes de aprendizaje.

Tabla 1. Resoluciones de videos de acuerdo a Google Inc. (2020).

Resolución	Nombre	Calidad
3840 x 2160	2160p	4K
2560 x 1440	1440p	2K
1920 x 1080	1080p	Resolución máxima Full HD
1280 x 720	720p	Resolución mínima HD
854 x 480	480p	Definición estándar
640 x 360	360p	Resolución normal de website
426 x 240	240p	Tamaño mínimo de vídeo en YouTube

El tamaño o volumen de un video se calcula a partir de características como la resolución, número de canales de grabación, número de frames por segundo y el tiempo de duración del video, en otra forma de calcular el tamaño del video es a partir del Bitrate del video y el tiempo de duración del video. La plataforma de video streaming YouTube utiliza una tasa de compresión de 8 MBPS, por lo que un RA de tipo video de un minuto de duración con las mínimas especificaciones tiene un volumen de 3.5 MB. En el portal de Queensland University (s.f.), se hace un análisis con las recomendaciones para crear videos con diferentes tipos de

ISSN: 2992-8338

formato de acuerdo al volumen. En el portal de CircleHD (2020) se presenta un análisis del tamaño de archivos de video de acuerdo a la resolución o la calidad de la imagen, en la tabla 2 se muestran los resultados del análisis de archivos de video de 1 minuto de duración.

Tabla 2. Volumen de videos de 1 minuto de acuerdo a la resolución CircleHD (2020).

Nombre	Tasa de Bits	Tamaño
4K(UHD)	20 MBPS	84 MB
1080p	5 MBPS	20 MB
720p	5 MBPS	5 MB
480p	500 KBPS	2 MB
4K(UHD)	20 MBPS	84 MB

Las recomendaciones del análisis de la utilización de videos en medios educativos que presenta el estudio de Guo et al. (2014), es de utilizar videos de solo 6 minutos de duración debido a que el tiempo de participación promedio es de 6 minutos como máximo, independientemente de la duración total del video. Además, se indica que 6 minutos de duración es el tamaño ideal porqué existe mayor participación de estudiantes con videos que duran entre 3 minutos y 6 minutos. Los resultados que presenta son parte del experimento de 4 cursos a más de 127 mil estudiantes con 862 videos y más de 6,902,358 sesiones.

3.4 Diferencia entre Video y Película

Para utilizar RA's de tipo video como medios educativos es necesario saber la diferencia entre un video y una película, esto permite determinar cuándo se debe utilizar una película o un video. De acuerdo con Stiller (2018), una película narra una historia y puede ser narrativa, documental o experimental. Una historia en una película está formada por varios elementos de imágenes en movimiento, fotografías, gráficos en movimiento, texto, música, diálogo y sonidos de ubicación. Un video es una grabación de un evento. El video es simplemente un medio económico de preservar una memoria como una reunión familiar, un partido de voleibol, un momento de orgullo para los padres o un tiempo con amigos.

3.5 Granularidad de Audios

Para utilizar RA de tipo audio en medios educativos es necesario saber cuál formato se ajusta a los requerimientos de la enseñanza, Guzmán y Mata (2008) indican que el formato MP3 es el que debe utilizarse en ambientes educativos, también menciona que la calidad de bitrate entre 64 y 128 kbps es suficiente para que los mensajes lleguen claramente al estudiante, además, ayudan a mantener una buena relación peso-calidad y puede ser distribuido con más facilidad en medios ópticos y por Internet. En cuanto a la duración del audio como elemento educativo, Cebeci y Tekdal (2006) mencionan que los audios deben tener una duración como máximo de 15 minutos para que los estudiantes no pierdan el interés.

3.6 Granularidad Propuesta

Después del análisis en diferentes trabajos de investigación y en diferentes sitios especializados en RA´s y E-Learning, se ha podido establecer una propuesta que permite identificar la granularidad enfocada en el volumen computacional por tipo de RA. En la tabla 3 se muestran 4 tipos de RA, de tipo Texto en la que se incluyen los archivos de Word, Excel, Power Point, archivos PDF y de texto plano; los archivos de tipo imagen, audio y video. De acuerdo con Gardner (1983) existen diferentes tipos de aprendizaje y para el aprendizaje no se debe de excluir a algún tipo de recurso, por lo que se incluyen los tipos de RA para ser entregados por un SWA.

Tabla 3. Granularidad de acuerdo al volumen por tipo de RA.

Tipo de RA	Granularidad Fina	Granularidad Media	Granularidad Gruesa
Texto	1 MB	3 MB	5 MB
Imagen	1 MB	3 MB	5 MB
Audio	1 MB	5 MB	10 MB
Video	5 MB	10 MB	15 MB
Tipo de RA	Fina	Media	Gruesa

4. PRUEBAS

Se presenta un conjunto de pruebas de SWA con RA's de diferente granularidad para evaluar la propuesta, en este conjunto de pruebas se consideran SWA de 1MB, 3MB, 5MB, 10MB y 15MB y de los tipos texto, imagen y video. Para esto se ejecutó cada prueba en 5 ocasiones para cada SWA, 25 grupos de solicitudes por prueba y 100 solicitudes por grupo. Los SWA están creados en Java en SOAP y en REST, y los parámetros de la JHS se definieron en XMS en 1024MB y XMX en 2048MB. El servidor utiliza un sistema operativo Debian 11 con 32 GB en RAM. El cliente utiliza el sistema operativo Linux Ubuntu 24, con Java 1.8 y 6 GB en RAM. En cuanto a la conectividad, la red es Ethernet Gigabit cableada, el servidor y el cliente están en distintos segmentos de la red. En las pruebas se consideran tres métricas, tiempo de respuesta, throughput y tasa de éxito. Es importante mencionar que todos los casos de prueba se ejecutaron en las mismas condiciones.

4.1 Métricas

Tiempo de Respuesta. Es el tiempo transcurrido entre el que se envía el grupo de solicitudes y se obtiene la última respuesta.

Throughput. Es el número de bytes por segundo que se envían por un canal de comunicación con una respuesta exitosa.

ISSN: 2992-8338

Tasa de Éxito. Es el porcentaje de solicitudes respondidas con éxito , esto indica que, el código de respuesta HTTP debe ser 200 y el recurso debe entregarse completo.

5. RESULTADOS

En los resultados se obtuvieron 1250 grupos de solicitudes, 625 grupos de solicitudes en SOAP y 625 grupos de solicitudes en REST. 25000 solicitudes para cada SWA de diferente tamaño. No se ejecutó ni se analizaron los datos con alguna función o método estadístico que permita evaluar la normalidad de los datos. Sin embargo, las gráficas y los datos se presentan en razón de la media estadística.

En la figura 2 se puede observar el comportamiento del tiempo de respuesta en segundos, el tiempo aumenta conforme el RA es de mayor volumen, en el caso de SWA de 1MB tiene los mejores resultados debido a que el volumen del RA es de menor tamaño. En cambio el servidor tarda más en responder con solicitudes realizadas a SWA de 10 y 15 MB, estos ocupan más espacio en la JHS, además de que utilizan más ancho de banda en el canal de comunicación.

La figura 3 muestra los resultados del throughput, en la gráfica de esta figura se visualiza que el mejor desempeño estáenSWAde3y5MB,esto se debe a que el SWA de 1 MB genera muy poco flujo de datos, los de 10 y 15MB tienen un tamaño mayor y los resultados de tasa de éxito son menores por lo que el flujo de datos de respuesta es menor que en SWA de menor tamaño.

La figura 4 muestra los resultados de la tasa de éxito, en estos se muestra el porcentaje de respuestas que entregan el RA completo. En SWA de 1 y 3 MBPS, el resultado de éxito es del 100 por ciento, en SWA de 5MB es de 60 por ciento, en SWA de 10 es de 30 porciento y de 18 por ciento en SWA de 15MB.

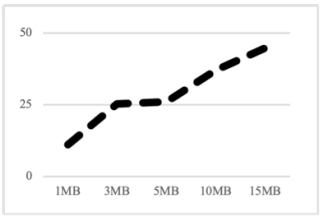


Figura 2. Resultados de Tiempo de Respuesta en segundos.



Figura 3. Resultados de Throughput en MBPS.

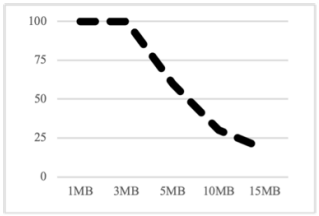


Figura 4. Resultados de Tasa de Éxito

6. CONCLUSIONS

A pesar de que existe gran cantidad y variedad de contenido educativo, el volumen computacional de dicho contenido no se ha analizado como propósito de incrementar o explotar el potencial de las plataformas de E-Learning. En este trabajo se analizaron diferentes tipos de RA y se propone la granularidad para los diferentes tipos de RA´s.

A partir de los resultados se observa que es importante definir los RA a partir del volumen computacional, un RA que rebase el tamaño propuesto o una actividad que rebase el tiempo de clase, difícilmente será desplegada en un SWA. Los resultados indican que la entrega del RA no está garantizada con SWA que entregan recursos de 5 MB o mayores y cuando se reciben 100 o más solicitudes de manera simultánea. El tamaño del RA que se entrega mediante un SWA influye en la tasa de éxito, en el tiempo de respuesta y en el throughput. Los mejores resultados se encontraron en SWA que entregan un RA más pequeño y de acuerdo al análisis de trabajos relacionados, los RA de tipo audio no deben ser mayor de 15 minutos de duración y los RA de tipo video no deben pasar de 6 minutos de duración, sin mucha edición ni efectos para que estos no sean motivo de distracción para el estudiante y tampoco se pierda el foco en el objetivo del RA. Los resultados de las pruebas apuntan a que utilizar RA de tamaño más pequeño permite solventar algunas limitantes de la arquitectura de servicios utilizada para el propósito educativo. La arquitectura de servicios consta de muchas aplicaciones, atributos, herramientas y plataformas; estas no están previstas en este trabajo pero es importante considerarlas.

La segmentación es una alternativa que permite dividir los RA de forma interna para aquellos que no sea posible su división, como es el caso de los RA´s de tipo video y audio, aunque existen herramientas que permiten dividirlos, la segmentación es una alternativa más sencilla.

En esta propuesta no se consideran los factores del contexto que intervienen en el proceso de aprendizaje, así como los estados anímicos, los aspectos cognitivos, pedagógicos ni el ambiente en el que este se desarrolla.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento al CONAHCYT y al TecNM/CENIDET.

REFERENCIAS

Cebeci, Z. y Tekdal, M. (2006). Using Podcasts as Audio Learning Objects. Interdisciplinary Journal of e-Skills and Lifelong Learning, 2, 047–057. doi:10.28945/400.

ISSN: 2992-8338

CircleHD (2020). How to Accurately Calculate Video File Size (Plus: Bonus Glossary). URL https://www.circlehd.com/blog/how-to-calculate-video-f

Erl, T. (2005). SOA: Principles of Service Design. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1 edition.

Fielding, R.T. (2000). Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Ph.D. thesis, University of California.

Fuentes Chab, I.H. (2019). Gestión de Recursos de Aprendizaje para Generar Servicios Web de Aprendizaje. M. Sc. Thesis, Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, México.

Gardner, H. (1983). Multiple intelligences. Basic Books, New York, NY, USA.

Google Inc. (2020). Choose live encoder settings, bitrates, and resolutions. URL https://support.google.com/youtube/answer/2853702.

Guo, P.J., Kim, J., y Rubin, R. (2014). How video production affects student engagement: An empirical study of MOOC videos. In L@S 2014 - Proceedings of the 1st ACM Conference on Learning at Scale, 41–50. Association for Computing Machinery. doi:10.1145/2556325.2566239.

Guzmán, J. y Mata, J.A. (2008). El sonido como herramienta tecnológica de apoyo a la educación. 5to Simposium Iberoamericano en Educación, Cibernética e Informática: SIECI 2008. URL http://sourceforge.net/projects/cdexos/.

Liu, N., Li, X., y Shen, W. (2014). Multi-granularity resource virtualization and sharing strategies in cloud manufacturing. Journal of Network and Computer Applications, 46, doi:10.1016/j.jnca.2014.08.007. URL https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1084804514001933.

Merino-Ibáñez, C. (2023). Metodología en la determinación de la granularidad de un Microservicio. M. Sc. Thesis, TecNM/Cenidet.

Muñoz Arteaga, J., Álvarez Rodríguez, F.J., y Chan Núñez, M.E. (2007). TECNOLOGIA DE OBJETOS DE APRENDIZAJE. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.

Muñoz Arteaga, J., Javier Álvarez Rodríguez, F., Osorio Urrutia, B., y Pedro Cardona Salas, J. (2006). Objetos de aprendizaje integrados a un sistema de gestión de aprendiza je. Apertura: Revista de Innovación Educativa, 6(3), 108–117.

Polsani, P.R. (2003). Use and abuse of reusable learning objects.

Queensland University (s.f.). Video Content Recommendations. URL https://web.library.uq.edu.au/library-services/it/learnuq-blackboard-help/learnuq-assessment/eportfolio/v

Stiller, M. (2018). Film vs Video vs Digital Media. URL https://medium.com/@murray_stiller/film-vs-video-vs-digital-media-eef4fb22a159.

Wisconsin Online Resource Center (2005). About Learning Objects. https://www.wisc-online.com/about-learning-objects.

ISSN: 2992-8338

Herramienta de Reestructuración para Diagramas de Clase UML Usados como Recurso de Aprendizaje

Arelia Desiderio-Patiño*, Olivia Graciela Fragoso-Díaz*, Juan Carlos Rojas-Pérez*

** Departamento de Ciencias de la Computación, TecNM/CENIDET, Cuernavaca, Morelos 62490 México (Tel: 777-362-7770; e-mail: m23ce040@cenidet.tecnm.mx, olivia.fd@cenidet.tecnm.mx, juan.rp@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: The increase in Internet access has allowed students and teachers to make use of learning resources available on the Internet; the daily routine with which this is done has caused them to fall into bad practices such as not verifying the quality of the materials that are used as learning resources. In areas where software development is taught, it is vitally important that the design in early phases of systems development follows the rules to create quality software. Using learning resources that do not comply with software design or quality principles in the initial stages can cause design errors and this results in software with defective quality. This document describes a web tool that makes it easier for the user to restructure UML class diagrams used as learning resources that have previously been evaluated with a quality model. This tool is useful for facilitators or teachers who use UML class diagrams taken from the Internet as learning resources for courses related to software design and development, as well as for people in general in a self-learning process to verify the quality of the resources that they employ.

Keywords: diagramas de clases, legibilidad, recurso de aprendizaje, correctitud, calidad.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos el internet ha tenido una expansión significativa, incluyendo la conectividad, lo que ha permitido democratizar el acceso a la información. Sin embargo, el que se tenga acceso a una gran cantidad de información, no garantiza que esta sea de calidad. Dentro de internet se pueden encontrar plataformas de aprendizaje, sitios web educativos, entre otros, con una gran variedad de elementos utilizados como recursos de aprendizaje.

La diversidad de fuentes que proveen recursos de aprendizaje en línea incrementa la probabilidad de encontrarse con material de baja calidad o que fueron generados con procesos o prácticas no adecuadas. Utilizar material en línea de manera indiscriminada para procesos de aprendizaje puede causar problemas en la adecuada adquisición de conocimiento a pesar de que dicho proceso este guiado por un facilitador que inadvertidamente este empleando recursos de baja calidad.

Dentro de la Ingeniería de Software, desde etapas tempranas del desarrollo de software, los diagramas UML son ampliamente utilizados entre otras cosas, para especificar y documentar las partes de un sistema de software, por lo que garantizar la correctitud de los diagramas UML contribuye a que en los procesos subsecuentes no se dispersen errores que puedan provocar fallos aún mayores en las etapas finales de desarrollo.

Como etapas tempranas tenemos el análisis y diseño del desarrollo de software, donde se utilizan los diagramas de clase UML para modelar la estructura del sistema y la relación entre sus componentes. Es relevante que desde un inicio se consideren evaluaciones objetivas en cuanto a calidad durante el proceso de desarrollo de software, buscando que al final se produzca un producto de calidad.

La importancia que los futuros desarrolladores tengan una percepción de calidad en su proceso de formación requiere que los recursos de aprendizaje empleados en su proceso de aprendizaje también cumplan con un nivel de calidad, ya que esto se verá reflejado en su etapa como profesional.

El problema que se aborda es sobre el uso indiscriminado de recursos de aprendizaje obtenidos en línea, específicamente diagramas de clase UML que pudiendo ser de baja calidad, pueden evitar la adecuada adquisición de conocimiento y como consecuencia no lograr los objetivos de aprendizaje esperados.

Para atender el problema antes mencionado, se propone una herramienta web que permite reestructurar diagramas de clases UML utilizados como recursos de aprendizaje. Los atributos que la herramienta puede reestructurar están de acuerdo con un modelo de calidad.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Esta sección trata sobre herramientas de reestructuración de diagramas de clases, mientras que en una sección posterior se presenta un panorama de los parámetros para evaluar la calidad de los recursos de aprendizaje.

2.1 Herramientas de reestructuración

Una propuesta de herramienta de reestructuración se muestra en Moghadam et al (2024) utilizando un enfoque doble, ya que la restructuración se lleva a cabo tanto en el código como en el modelo UML, considerando que ciertas cosas son más

ISSN: 2992-8338

fáciles de realizar en alguno de los dos modos. La herramienta que se describe en el trabajo antes mencionado hace uso del código para poder ofrecer ayuda interactiva al desarrollador para localizar errores de diseño. Las ayudas visuales ofrecidas al desarrollador también buscan ayudar en la elección de soluciones que sean factibles. Una vez que la herramienta realiza la reestructuración, es el propio desarrollador quien debe confirmar si las modificaciones realizadas son aceptables.

Un sistema automatizado para evaluar la disposición de los elementos de los diagramas de clases se presenta en Bergström (2022), haciendo uso de inteligencia artificial, la cual basándose en la extracción de características a partir del procesamiento de imágenes emita una valoración. El autor menciona el uso de este evaluador para uso en la academia. Para lograr la operación del evaluador se utiliza modelos de regresión lineal sobre imágenes de diagramas de clase que previamente fueron evaluadas manualmente por expertos.

En el trabajo realizado por Sidhu et al (2020), presenta un sistema que evalúa diagramas de clases UML empleando una perspectiva no tradicional al enfocarse en las descomposiciones funcionales en lugar de enfocarse en errores puntuales. Bajo la premisa que atacar errores en un contexto más grande en lugar de errores puntuales, reducirá los ciclos de refactorización. Para realizar la evaluación se utiliza una red neuronal entrenada para detectar descomposiciones funcionales en modelos UML de software que emplea el paradigma de programación orientada a objetos. Además, hace uso de métodos de ciencias de datos para mejorar la descripción de los modelos que evalúa.

El uso de inteligencia artificial ya ha sido probado para la detección de errores de diseño en diagramas UML como se describe en el trabajo realizado por Alazba et al (2024) donde se estudia la manera de detectar errores de diseño empleando técnicas de inteligencia artificial, sin embargo, aun estas técnicas requieren trabajo manual que no puede ser práctico para situaciones con mucha información. Por lo que en este trabajo se propone sistemas no supervisado.

Hasta el momento de la redacción del documento no se ha encontrado en la literatura algún desarrollo que permita evaluar y reestructurar diagramas de clase UML, sobre todo, que estén enfocados en una evaluación dentro de un contexto de recurso de aprendizaje.

2.2 Calidad en los recursos de aprendizaje

La relevancia de la educación en línea en lugares donde el acceso a internet se encuentra en auge se analiza por Alenezi (2020) donde concluye que la correlación entre utilizar buenos recursos de aprendizaje y el desempeño no solo del estudiante sino del docente, es fuerte.

Para abordar la evaluación de un recurso de aprendizaje es importante considerar la naturaleza de éste, particularmente en este documento se trata de diagramas de clases UML, por lo que podría abordarse desde el punto de vista de un objeto gráfico y también como un elemento que debe seguir normas y estándares de la ingeniería.

Existe un marco para evaluar la calidad de recursos de aprendizaje multimedia propuesto por Abdulrahaman (2020) que consta de evaluar no solo recursos de imágenes y texto como los encontrados en los diagramas de clases UML, sino que considera audio, video y animaciones tridimensionales. Hace notar que no solo basta evaluar el contenido del recurso de aprendizaje, sino que se debe tomar en cuenta la audiencia.

Otro autor como Pasichnyk (2023), toma en consideración la capacidad de modificación, la arquitectura, la funcionalidad e introduce que el recurso de aprendizaje cumpla con la normativa de estándares educacionales. Para realizar la evaluación utiliza un sistema de lógica difusa.

Cabe mencionar que el presente trabajo se enfoca a la parte visual de un diagrama de clases, haciendo énfasis en la representación gráfica y en la parte de diseño.

3. MODELO DE CORRECTITUD

En este trabajo se usa como referencia el trabajo realizado por Sandoval (2023), en él se expone un modelo de calidad enfocado a evaluar diagramas de clase UML. En dicho modelo, el atributo principal con el que se cuantifica el nivel de calidad de un diagrama de clases UML que es utilizado como recurso de aprendizaje se le nombra correctitud. A partir de este atributo principal, el autor lo subdivide en dos factores: la correctitud en dominio UML y la correctitud en legibilidad. Cada factor tiene un valor asociado que contribuye en la valoración final del recurso de aprendizaje. Para el factor de correctitud en dominio UML se tiene una ponderación del 60%, mientras que el 40% restante corresponde al factor de correctitud en legibilidad.

El factor correctitud de dominio UML evalúa que sea correcta la aplicación de las reglas establecidas para los diagramas de clase UML, se divide a su vez en cinco parámetros: (a) Abstracción, (b) Herencia, (c) Relaciones, (d) Interfaz y (e) Clases y operaciones abstractas.

En lo que concierne al factor de correctitud en legibilidad se refiere a que tan comprensible es el diagrama al momento de analizarlo visualmente. Esto conlleva a dos aspectos importantes para los fines del trabajo aquí presentado, el primero corresponde al caso en que el estudiante de manera visual no puede interpretar el diagrama, provocando muy probablemente que lo descarte de manera inmediata, previniendo la finalidad del diagrama como recurso para lograr un objetivo de aprendizaje. El segundo aspecto es el hecho de que el modelo de calidad evalúa la representación visual de un diagrama de clases.

Los parámetros que conforman el factor de correctitud en legibilidad son seis, el primero de ellos corresponde a la difuminación y/o nitidez del diagrama, el cual el autor del modelo de calidad le otorgó la mayor ponderación entre todos. Esto es concordante a lo mencionado en el párrafo

ISSN: 2992-8338

anterior, un diagrama que no puede ser interpretado por el ojo humano, difícilmente podrá ser comprendido.

El segundo parámetro corresponde al grosor de los bordes en los gráficos del diagrama, haciendo énfasis en los bordes gruesos que pueden provocar un mayor oscurecimiento del diagrama. El tercer parámetro es respecto al color utilizado en los diagramas, recomendando principalmente el uso de fondo blanco y trazos en color negro. El cuarto parámetro es el tamaño de la letra, que no debe ser pequeña ni grande, pero sobre todo el uso de texto plano.

En cuanto a las esquinas en las líneas de relación, que es el quinto parámetro, se refiere a que entre menos quiebres tenga una línea de relación en el diagrama, es mejor para quien usa el recurso de aprendizaje. Finalmente, el sexto parámetro concierne a la situación en la que, si dos líneas de relación se cruzan, se castiga en la evaluación.

A cada uno de los parámetros mencionados anteriormente le corresponde una ponderación, como se observa en la Tabla 1. El valor que se obtiene al final de la valoración, indica el valor de correctitud del diagrama de clases.

Tabla 1. Parámetros evaluados en el factor de legibilidad

Parámetro	Ponderación
Difuminación / Nitidez	10%
Grosor	5%
Color de fondo y líneas	8%
Tamaño de letra	6%
Esquinas en las líneas de relación	5%
Superposición de líneas de relación	6%

El autor del modelo de correctitud menciona que la ponderación se puede considerar como una propuesta, y que estos pueden cambiar en función de las necesidades o a partir de la opinión de los expertos cuando hagan uso del modelo.

La importancia de los aspectos de legibilidad reside en que, si se dificulta la interpretación del diagrama, dejará de ser atractivo y probablemente dejará de ser usado, perdiendo su razón de ser y previniendo el logro de los objetivos de aprendizaje.

4. DESARROLLO

Para realizar la herramienta, se seleccionó el modelo de correctitud descrito en la Sección 3, que sirve de referente para evaluar los recursos de aprendizaje. Al momento la herramienta se encuentra en desarrollo, por lo que únicamente se centra en aspectos relacionados a legibilidad, falta incluir todos los aspectos que considera el modelo de calidad.

La herramienta utiliza tecnologías web cuyo principal requerimiento es corregir diagramas de clases UML contenidos en archivos de PowerPoint (.pptx). La metodología consiste en obtener los metadatos contenidos en el archivo digital y es a partir del procesamiento de estos metadatos que se realiza la evaluación.

La Figura 1 representa el diagrama de casos de uso UML del sistema donde se tiene como actores al usuario y el sistema. Para dicho diagrama se ha de considerar que el sistema se encuentra funcionando y que el usuario ha ingresado a la página inicial del sistema.

Dentro de la página inicial, el usuario puede registrarse por primera vez o en caso de haberlo hecho con anterioridad, podrá acceder a la herramienta después de autenticarse con su usuario y contraseña. Una vez que el usuario ha ingresado a la aplicación, carga al servidor un archivo digital en formato pptx que contiene el recurso de aprendizaje.

Después de cargar el archivo digital, el sistema está listo para evaluar el recurso de aprendizaje, aquí el usuario elige los atributos que serán cambiados por el sistema. Si el usuario no selecciona algún atributo a corregir, la herramienta no genera un nuevo archivo pptx, en caso contrario, cuando el usuario elige al menos un atributo a corregir, se generará un nuevo recurso de aprendizaje contenido en un archivo pptx.

El nuevo recurso de aprendizaje generado en formato pptx queda a disposición del usuario para descargarlo, al concluir la descarga se muestra un mensaje de confirmación. El usuario puede optar por volver a iniciar el proceso para un recurso de aprendizaje diferente o finalmente cerrar la sesión de trabajo.

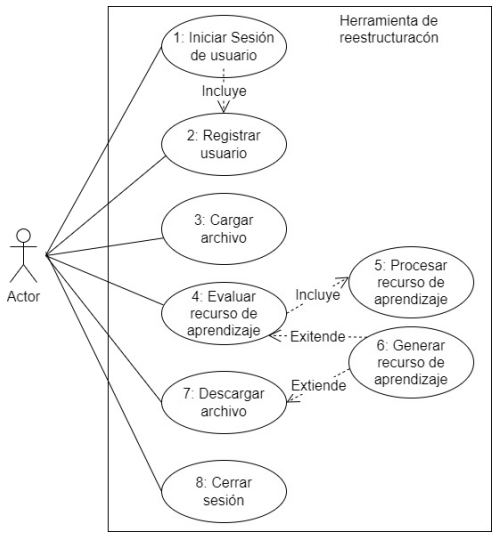


Figura 1. Diagrama de casos de uso UML de la herramienta

La Figura 2 resume la conformación de la aplicación web que se ejecuta sobre un servidor Apache Tomcat 8. Para el manejador de base de datos se emplea MySQL server 5.5. Para el desarrollo de la herramienta se utilizó el patrón

ISSN: 2992-8338

ModeloVista-Controlador (MVC), donde la parte del modelo se codificó en java 1.8, la parte de las vistas se logró con JavaServer Pages (JSP) y la parte del controlador se obtuvo con servlets apoyándose de Dynamic Web module 3.1.

Actualmente la herramienta se desarrolló con una sola clase programada en java que incluye diversos métodos para realizar las modificaciones en los recursos de aprendizaje, así como de su lectura, apoyándose de la biblioteca Apache POI para manipular los archivos .pptx. Otras clases que se codificaron están relacionadas a los procesos de interacción con la base de datos, como por ejemplo el alta de usuarios, mientras que otras se enfocan en realizar el proceso de conexión del sistema a la base de datos.

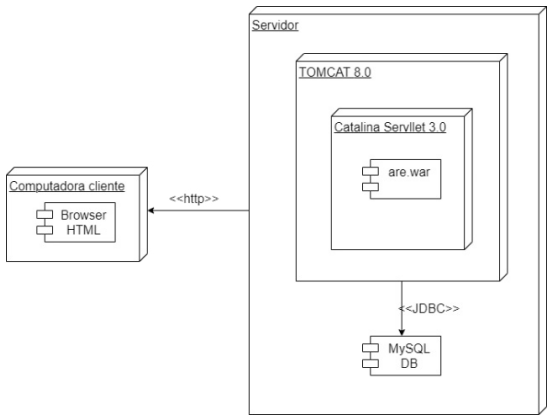


Figura 2. Diagrama de componentes UML de la herramienta

Los servlets desarrollados añaden dinamismo al sistema web y se encargan de gestionar la sesión de usuarios, cargar y descargar los recursos de aprendizaje en la herramienta y la interacción con la clase programada en java para modificar el recurso de aprendizaje. La herramienta solo almacena un recurso de aprendizaje a la vez en el servidor, una vez cargado, se almacena de manera temporal en el servidor hasta que el usuario cierra la sesión, posteriormente el recurso es eliminado.

Las vistas implementadas en la herramienta son siete, una de ellas es la vista inicial de la herramienta, en ella se puede dar de alta un nuevo usuario o iniciar sesión para utilizar la herramienta. Cuando el usuario inicia sesión, el sistema pasará de la vista inicial a otra vista, como la mostrada en la Figura 3, donde tendrá a disposición las opciones de la herramienta: subir archivo, procesar archivo, descargar archivo y cerrar sesión. Cada una de las opciones anteriores tiene su propia vista.

Cada una de las vistas está pensada para realizar algún proceso principal de la herramienta. En la Figura 4 se observa la vista "procesar archivo", la cual ofrece al usuario las opciones que se han implementado a la fecha. Se dio preferencia a los aspectos de legibilidad de acuerdo con el modelo de correctitud descrito en la Sección 3. La herramienta ofrece al usuario la libertad de elegir el parámetro de calidad a reestructurar, dando flexibilidad al usuario para que el recurso de aprendizaje sea cambiado de acuerdo con sus necesidades. Las opciones incluyen modificar el tamaño de texto, el color de las relaciones de clases en los diagramas, y el color de fondo del diagrama.

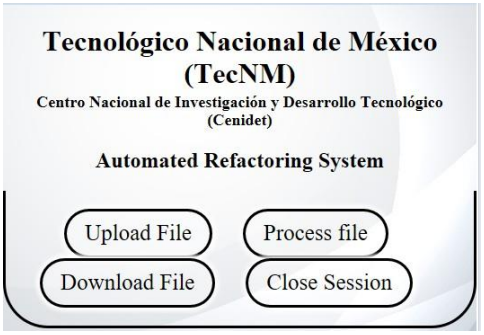


Figura 3. Vista principal de la herramienta.



Figura 4. Vista procesar archivo de la herramienta.

5. RESULTADOS

Como ejemplo del funcionamiento de la herramienta, se muestra en la Figura 5 un diagrama de clases el cual no cumple con los criterios de legibilidad. Las características del diagrama de clases UML que no cumplen con el factor de correctitud en legibilidad son: el color de fondo en azul, el fondo de las clases en amarillo y las relaciones de las clases en color rojo.

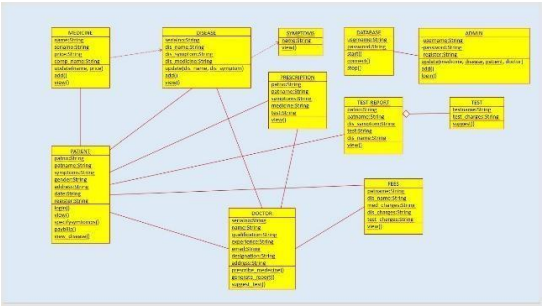


Figura 5. Diagrama de clases UML antes de ser procesado.

ISSN: 2992-8338

En la Figura 6 se tiene el resultado de procesar el recurso de aprendizaje con la herramienta de reestructuración. Se puede observar que en el recurso de aprendizaje se ha modificado el color de las líneas de las relaciones, las cuales antes eran rojas, donde este color no es parte de una buena legibilidad y se han modificado a un color negro como parte del proceso de mejorar la legibilidad del recurso de aprendizaje. Otro cambio realizado fue modificar el color de fondo, el cual se cambió de azul a color blanco.

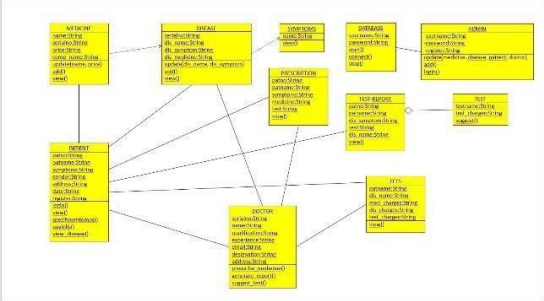


Figura 6. Diagrama de clases UML después de ser procesado.

Para verificar el funcionamiento de la herramienta se han realizado pruebas con un conjunto de 130 diagramas de clases, pero en este documento solo se presenta un ejemplo.

6. CONCLUSIONES

El sistema permite evaluar las características gráficas de los elementos que conforman un diagrama de clases UML, y a petición del usuario, modificarlas en función de buenas prácticas de diseño para recursos de aprendizaje. Hasta el momento se abordaron características de legibilidad en los diagramas de clases, por lo que la herramienta ayuda a generar recursos de aprendizaje de fácil lectura para el usuario y contribuye a enfocar la atención de quien consume estos recursos en cuanto al contenido, y no en aspectos gráficos llamativos que dispersan la atención. Como trabajo futuro se abordará la problemática de evaluar el correcto establecimiento de clases, herencias y relaciones en el contexto de la programación orientada a objetos dentro de los diagramas de clase UML usados como recursos de aprendizaje.

REFERENCIAS

Abdulrahaman, M. D., Faruk, N., Oloyede, A. A., Surajudeen-Bakinde, N. T., Olawoyin, L. A., Mejabi, O. V., & Azeez, A. L. (2020). Multimedia tools in the teaching and learning processes: A systematic review. *Heliyon*, 6(11).

Alazba, A., Aljamaan, H. & Alshayeb, M. (2024). Automated detection of class diagram smells using self-supervised learning. *Autom Softw Eng,* 31, 29.

Alenezi, A. (2020). The role of e-learning materials in enhancing teaching and learning behaviors. *International Journal of Information and Education Technology*, 10(1), 48-56.

Bergström, G., Hujainah, F., Ho-Quang, T., Rukmono, R.J., Nurwidyantoro, A., Chaudron, M.R.V. (2022). Evaluating the layout quality of UML class diagrams using machine learning. *Journal of Systems and Software*, 192.

Hemati Moghadam I, Ó Cinnéide M, Sardarian A, Zarepour F. (2024). Model-based source code refactoring with interaction and visual cues. *J Softw Evol Proc*. 36(5),

Pasichnyk, V., Kunanets, N., Yunchyk, V., Khomyak, M., Yatsyuk, S., Muliar, V., & Fedonuyk, A. (2023). Model of the Recommender System for the Selection of Electronic Learning Resources. *In MoMLeT+ DS,* 344-355.

Sidhu, B. K., Singh, K., & Sharma, N. (2020). A machine learning approach to software model refactoring. *International Journal of Computers and Applications*, 44(2), 166–177.

Sandoval-Acosta, J.A. (2023). Uso de Reglas de Dominio para Evaluar Recursos de Servicios Web de Aprendizaje. *Tesis de Doctorado, TecNM/CENIDET*. Repositorio Institucional – TecNM/CENIDET. Morelos, México.



ECONOMÍA SOCIAL SOLIDARIA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Review Expert Module on Intelligent Tutoring Systems

Magali García[*,], Yasmín Hernández[*], Ivanhoe Osorio[**], Astrid Torres[***]**

[*] *TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor. 62490 México (e-mail: yasmin.hp@cenidet.tecnm.mx, javier.oh@cenidet.tecnm.mx,arturo.mg@cenidet.tecnm.mx).*

[**] *TecNM/Instituto Tecnológico de Iztapalapa III, Ciudad de México, CDMX. 09630 México (e-mail: sandra.gg@iztapalapa3.tecnm.mx ivanhoe.ol@iztapalapa3.tecnm.mx).*

[***] *TecNM/Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, Tlaxcala, Tlax. 90122 México (e-mail: astrid.tf@altiplano.tecnm.mx).*

Abstract: Intelligent Tutoring Systems are computer-based learning systems that adapt to the needs of a student or student. Studies have identified the importance of the Expert Module in Intelligent Tutoring Systems, since this module contains knowledge about the subject. In research papers they state that it would take at least 10 years of experience to achieve the levels of performance commonly attributed to geniuses in subjects such as mathematics and music to be able to accumulate enough knowledge to allow exceptional work in these complex areas. (Hayes, 1985). The large amount of knowledge required in the Expert Module of an Intelligent Tutor System and the way in which you implement Artificial Intelligence techniques guarantees that the development of the module requires a lot of attention, coupled with this the constancy of communication with your other colleagues in the architecture of the Intelligent Tutor System such as: the Student Model, Tutor Module and Interface Module that integrate for the functionality of the Intelligent Tutor System.

This research shows an analysis of three articles where different ways of representing knowledge are implemented in the Expert Module of an Intelligent Tutor System.

Keywords: Expert Module, Intelligent Tutor System, knowledge representation, knowledge models, methodologies.

1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Tutores Inteligentes se han desarrollado durante el comienzo de la tecnología y la evolución de la inteligencia artificial se han desarrollado los sistemas tutores inteligentes, que son definidos por algunos autores como: Un Sistema Tutor Inteligente son sistemas computacionales diseñados para impartir instrucción y apoyar inteligentemente los procesos de enseñanza aprendizaje mediante la interacción con el alumno. (Arias, Jiménez, & Ovalle, 2009). Su objetivo principal del Sistema Tutor Inteligente, además de dominar un área de conocimiento en específico, es desarrollar una metodología que se adapte al alumno e interactúe dinámicamente con él (Hernández y Rengifo, 2015).

Los sistemas tutores inteligentes o por sus siglas en ingles STI 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. Arquitectura de un STI por Laureano & De Arriaga, 2000 y Laureano, Terán-Gilmore & Rodríguez, 2005, constituye a 4 módulos, los cuales son: Módulo del Experto, Módulo del Estudiante, Módulo Tutor y Módulo Interfaz.

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

Se enfoca en el funcionamiento y elementos que contiene el Módulo Experto en algunos Sistemas Tutores Inteligentes, comprobando su

ISSN: 2992-8338

funcionalidad con diferentes técnicas y metodologías incluso proponiendo otros modelos implementados en un STI estándar. En la actualidad el Módulo Experto no ha sido tan explorado en los STI, nos percatamos que existe pocas investigaciones que contribuyan al mejoramiento de este Módulo.

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 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.

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).

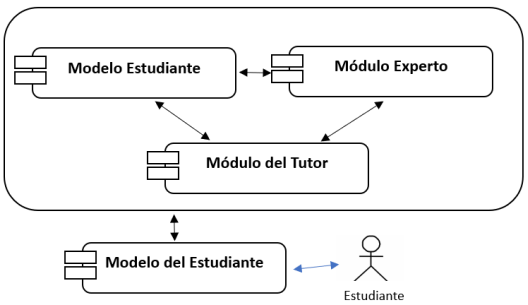


Figura 1 Arquitectura de un Sistema Tutor Inteligente.

2.2 Módulo Experto en el STI

Como antes ya se había mencionado, el Sistema Tutor Inteligente lo integran cuatro módulos, en este apartado nos enfocaremos en entender el Módulo Experto o también conocido como Módulo Dominio, en el libro fundamentos de Sistemas Tutores Inteligentes de Martha C, Polson y Jeffrey Richardson en su capítulo 2 “The Expert Model” mencionan que el Módulo Experto es una columna vertebral de cualquier STI, haciendo referencia que un sistema de instrucción poderoso no puede existir sin un cuerpo poderoso de conocimiento del dominio y existen factores que con frecuencia, y tal vez típicamente, los módulos expertos de un STI están incompletos y, como consecuencia, pueden proporcionar sólo una parte de la instrucción requerida en el módulo experto, basado en esto nos se deduce que un módulo experto potente y bien construido debe tener abundante conocimiento.

3. ANÁLISIS DEL MÓDULO EXPERTO EN STI

En esta sección se describen tres modelos de construcción del conocimiento en el Módulo Experto de un Sistema Tutor Inteligente. Estos tres artículos fueron seleccionados, por su enfoque y elementos utilizado en los modelos, profundizando más sobre el desarrollo de la representación del conocimiento implementado en el Módulo Experto de un STI.

3.1 Method for the construction of the domain model in an intelligent programing tutor

Este artículo del año 2014, tiene como objetivo presentar un método para la construcción del modelo de dominio para un Tutor Inteligente de Programación (TIP) que este contribuya a la reducción de tiempo de autoría de forma que se genere retroalimentación efectiva para las actividades de ejercicios o implementación un STI desarrollado. Los métodos utilizados fueron relacionados con el análisis y síntesis, entrevistas y encuestas, realizaron un análisis documental relacionado con los TIP y la efectividad de la retroalimentación, así como las técnicas utilizadas y un estudio sobre técnicas de análisis estático y dinámico de programas y formas de representación de las características de las soluciones. En la Figura 2 se muestra el modelo propuesto, integrando las evaluaciones de solución en el STI.

ISSN: 2992-8338

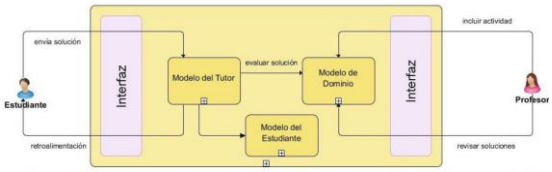


Figure 2 Procesos y relaciones entre modelos del STP (Altuna Enrique, Guibert Lisandra, Estrada Vivian,2014).

Se hace uso de técnicas de caja negra, análisis estático y análisis dinámico para la generación de retroalimentación tomando como entrada el código fuente del estudiante.
El modelo de dominio toma como entrada el nivel hasta el que se genera la retroalimentación en cada caso, que es determinado por otros componentes del sistema en función de alguna estrategia pedagógica. La retroalimentación que se entrega se divide en 6 niveles (Figura 3), donde cada nivel se muestran las contribuciones correspondiente a los anteriores niveles:

- Nivel 0: El resultado de la evaluación automática mediante técnicas de caja negra.
- Nivel 1: Información sobre la estructura del programa que se genera con técnicas de análisis estático.
- Nivel 2: Información general sobre el comportamiento del programa en tiempo de ejecución. Se obtiene
- mediante técnicas de análisis dinámico.
- Nivel 3: Información específica sobre el comportamiento en tiempo de ejecución sobre situaciones
- sospechosas y se incluye un análisis sobre el flujo de datos para la conformación de las salidas del programa.
- Nivel 4: Los juegos de datos con los que se comprueba la solución en el sistema y se muestran las diferencias
- entre la salida generada por el estudiante y la esperada según lo especificado por el creador del problema.
- Nivel 5: Se muestran las soluciones propuestas y comentarios realizados por el profesor

Figura 3 Niveles del ITP

Para la revisión de soluciones aplicaron los 5 niveles dentro, se centra el nivel 5 retroalimentación el cual se basa en la revisión de soluciones debido a que Posibilita incrementar el conocimiento codificado sobre las actividades a través de las interacciones de los estudiantes. Para llegar a esto es importante reconocer las soluciones filtradas que se presentan al profesor donde clasifica y verifica las correctas y no correctas, e incluye comentarios adicionales, generan un conjunto de soluciones inspeccionadas por un profesor y clasificadas como significativas que llamadas soluciones revisadas C_r. Un conjunto de soluciones inspeccionadas por un profesor y clasificadas como muy similar a una solución significativa catalogada anteriormente que llamaremos soluciones desechadas C_d. Un conjunto de soluciones enviadas por lo estudiantes que no se encuentran en C_r o en C_d que llamaremos soluciones enviadas C_e. Es necesario resolver el problema de encontrar un conjunto de soluciones filtradas $C_f \subset C_e$ tal que $\forall f \in C_f \forall e \in Ce \cap Cf :$ $p(f) > p(e)$ siendo p una función de puntuación que determina el cumplimiento de las características deseadas.

Usa como medida de similitud la variación de neighbor matching propuesta por (Vujošević-Janičić, Nikolić et al., 2013). La cual es:

Donde Y_{ij} es la similitud del contenido de los nodos i y j. Así mismo los elementos de A y B de mayor peso es un problema de asignación, que puede ser resuelto a través del algoritmo húngaro, aunque existen otros más eficientes. La matriz de similitud [xij] refleja la similitud de los nodos de dos grafos A y B, con la similitud de los grafos se define como el peso de la correspondencia óptima dividido por el número de pares en la correspondencia como:

$$s(G_A, G_B) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^{n} x_{f(l)g(l)}$$

Ecuación 1 Similitud de nodos de dos grafos

Se aplico estas ecuaciones de similitud en dos propuestas de autorías, se experimento usando profesores y actividades reales con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas entre los tiempos de autoría para cada propuesta, utilizando 12 profesores universitarios con más de 5 años de experiencia en la disciplina de programación, fue aplicado a los a lo largo de un semestre y en este periodo cada participante trabajó sobre 10 actividades de similar nivel de dificultad (las mismas para todos los participantes) y las 10 propuestas diferencias significativas entre los tiempos de autoría para cada propuesta y sus indicadores de efectividad fueron los siguientes que se muestran en la tabla 1.

Propuesta	Utilidad	Especificidad	Completitud	Capacidad cognitiva
PHP ITS	x	x		x
J-LATTE	x	x		x
Enström, Kreitz et al. 2011			x	
JITS	x	x		
Naudé, Greyling et al. 2010		x	x	
ELP	x	x		
Jurado 2010	x	x		
Verificator	x			
BlueFix	x			
Instructor (propuesta del autor)	x	x	x	

Tabla 1 Indicadores de efectividad de lo retroalimentación por propuesta

En relación con las propuestas alternativas, se puede afirmar que a pesar que se renuncia a una de las características que contribuyen a la efectividad de la retroalimentación, se logra incorporar la capacidad para utilizar características específicas del problema en el análisis.

3.2 Modelo de Dominio de Ontología para Sistema de Tutoría Electrónica E- tutor

Este artículo del año 2020, propone un modelo de dominio de ontología que incluye, la arquitectura del STI, una base de ontología compartida en común, afirmando que la bases de datos de

ISSN: 2992-8338

ontologías pueden mejorar la calidad de los modelos tanto del tutor, como del estudiante, así que este artículo se centra en el módulo dominio o experto, con el objetivo de que prepare el material de acuerdo a las capacidades del estudiante, este modelo propuesto cumple con las características de reutilización, conocimiento abierto y flexibilidad.

La ontología se puede utilizar para controlar el flujo de trabajo en los sistemas de gestión de aprendizaje electrónico. La ontología de dominio también proporciona una herramienta para la especificación y validación formal del aprendizaje electrónico que se comunicará entre personas y aplicaciones, una definición de la ontología es una tecnología eficaz que permite la integración de recursos relacionados, comparte el conocimiento correcto y evita información irrelevante (GSB Sunitha Abburu, 2013).

E- tutor se plantea como una herramienta integral de aprendizaje digital que acelera la colaboración e interacción entre estudiantes y profesores, directores y administradores en cualquier lugar y en cualquier dispositivo.

El modelo de la figura 4 del STI propuesto es el siguiente:

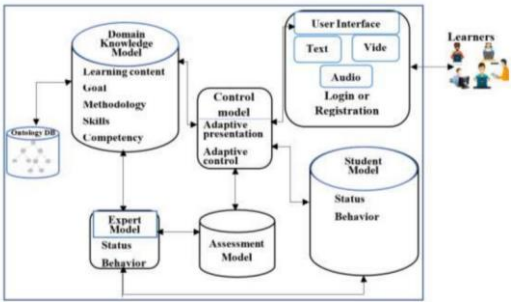


Figura 4 Modelo de arquitectura de tutor electrónico propuesto (László Csépányi-Fürjes & Ghanim Hussein Ali Ahmed ,2020).

Los sistemas ITS actuales se basan en algunos componentes funcionales clave. Los sistemas suelen contener los siguientes módulos:

1.Módulo de dominio para describir los temas del curso, incluidas las unidades de conocimiento y competencias.
2.Módulo de estudiante para modelar el comportamiento de los estudiantes.
3.Módulo de profesor para modelar el comportamiento del tutor.
4.Repositorio de cursos para almacenar las diferentes ayudas de estudio y materiales del curso.
5.Módulo Interfaz para implementar una interfaz inteligente y orientada al ser humano para el sistema.

Esta investigación sugiere la implementación del módulo en una nueva forma de integración que incluya metodologías y algoritmos existentes.

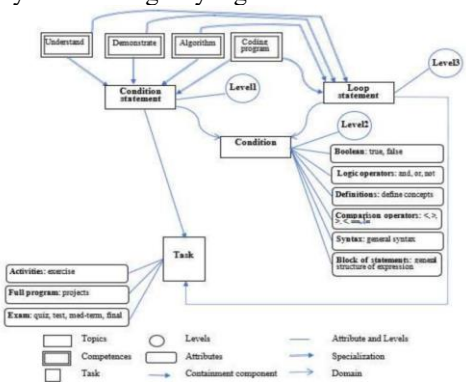


Figura 5 Modelo general del dominio (László Csépányi-Fürjes & Ghanim Hussein Ali Ahmed ,2020).

En la figura 5 el modelo de dominio propuesto, se define en los siguientes términos que significan:
Definen el conocimiento del dominio o una unidad de información integral sobre temas específicos. materia o curso. La competencia se utiliza para definir y demostrar características y habilidades que permiten y mejoran la eficiencia del desempeño de un estudiante para comprender temas específicos y adquirir nuevos conocimientos. La tarea se utiliza para definir cómo puede el estudiante terminar una actividad que debe realizarse dentro de un período de tiempo definido. El nivel se utiliza para definir cómo el sistema de tutoría electrónica puede determinar el conocimiento del estudiante. El atributo se utiliza para definir el atributo de un tema o dominio específico en un modelo de dominio específico. El componente de contención se utiliza para definir que el tema específico contiene diferentes componentes en el dominio. La especialización se utiliza para definir que algunos temas o dominios tienen características específicas. El dominio se utiliza para definir los conocimientos a aprender y Contiene información material didáctica.

El conocimiento de dominio (DK) es una colección de propuestas que aclaran todos los conceptos del vocabulario para discutir o resolver problemas. DK es sólo declarativo y no dice cómo los estudiantes pueden utilizar el conocimiento del dominio para resolver un problema práctico.
La base de conocimiento esta propuesto en lo siguiente.

En la figura 6 se muestra el modelo que muestran el tema se utiliza para presentar el conocimiento del dominio específico o una unidad de información integral sobre el flujo de control en el lenguaje de programación Java. La estructura se utiliza para definir la estructura de declaraciones condicionales

ISSN: 2992-8338

y declaraciones de bucle en el lenguaje de programación Java. El componente de contención se utiliza para definir el tema específico que contiene diferentes componentes en el lenguaje de programación Java. La evaluación se utiliza para definir cómo el sistema puede evaluar la rama de declaraciones en expresión. El atributo se utiliza para definir el atributo de declaración condicional y de bucle en la programación.

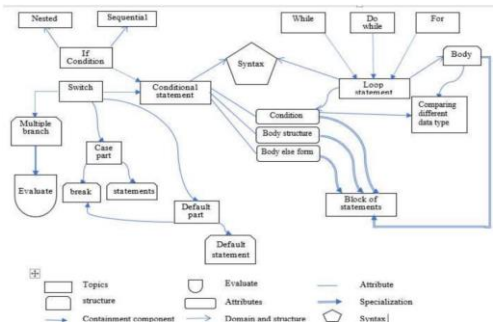


Figura 6 Modelo del conocimiento propuesto. (László Csépányi-Fürjes & Ghanim Hussein Ali Ahmed ,2020).

Actualmente definen en este artículo que esta arquitectura es adaptable se probó en varios lenguajes de programación como lo es Python y Java, también contiene módulos estándar, una base de datos compartida y también una base de conocimientos.

3.3 Gestión de conocimiento en el Módulo Experto del Sistemas Tutores Inteligentes.

Este artículo publicado en mayo 2020, presentar la arquitectura de procesamiento del conocimiento y la lista de técnicas de modelo experto utilizadas en un sistema de tutoría inteligente, describiendo la implementación del problema del modelo experto se ejecutará utilizando la red bayesiana, para un sistema inteligente de aprendizaje electrónico.

El proceso propuesto procesamiento de conocimiento en el módulo experto, está basado en una solución pedagógica. Basado en la arquitectura de un STI estándar el conocimiento en el modelo experto es de conocimiento declarativo, procesando ese conocimiento en tres categorías las cuales son el conocimiento declarativo, procedimental y condicional, y cada uno de ellos puede ser implícito o explicito, así como se muestra en la figura 7.

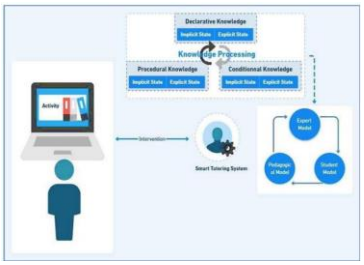


Figura 7 Procesamiento de conocimiento en el modelo experto (Fatima-Zohra, Otman ABDOU, Khatir Haimoudi, 2020).

En la figura 8 proponen el uso de mecanismos analítico y predictivo con la finalidad de tomar en cuenta las características personales del alumno recopiladas a partir de los datos de un recurso en lugar de las herramientas pedagógicas.

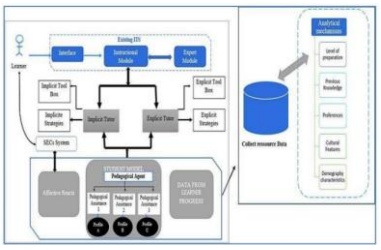


Figura 8 Integración de mecanismos analíticos en el modelo de retroalimentación (Fatima-Zohra, Otman ABDOU, Khatir Haimoudi, 2020).

Con la implementación de este modelo resuelve el tipo de evaluación de Memorización, Administración y Experiencia.

La Figura 9 representa la red bayesiana desarrollada del procesamiento del conocimiento que tiene tres nodos padres; estado de la actividad; la actividad de aprendizaje y la categoría del conocimiento. Estos tres están compuestos por un nodo secundario como se muestra en la figura 9.

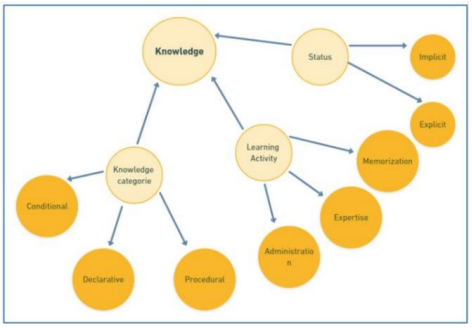


Figura 9 Red bayesiana de procesamiento de conocimiento *(Fatima-Zohra, Otman ABDOU, Khatir Haimoudi, 2020).*

Esta implementación pudo realizar una adaptabilidad a su tutor pedagógico pudo intervenir utilizando las bases de gestión de conocimiento que gestionan toda probabilidad. Además, de que puede predecir una alta comparación de conocimiento del alumno con la acción de un experto para mejorar la evaluación de un alumno.

ISSN: 2992-8338

3. DISCUSIÓN

Como parte de la revisión de esta investigación sobre los Sistemas Tutores Inteligentes y su aplicación en el Módulo Experto, en la siguiente tabla se realiza un análisis basado en técnicas y modelos de conocimiento aplicado en el Módulo, cabe mencionar que un sistema tutor inteligente ayuda y aporta un conocimiento en cualquier tema que el estudiante desea aprender, por tal motivo esta investigación se centra en ese conocimiento abundante que los STI deben de contener. Se sabe que los STI se 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.

Artículo	Técnica	Modelo de conocimiento	Área de conocimiento
1. Method for the construction of the domain model in an intelligent programing tutor (2014).	Técnica de **Caja Negra** manching learning.	Se integran los 6 niveles de conocimiento que integran al estudiante, interacciones y datos relacionados con su retroalimentación.	STI para aprender lenguajes de programación (Java y Python).
2. Modelo de Dominio de Ontología para Sistema de Tutoría Electrónica E- tutor (2020).	**Ontologías** basado en la arquitectura de un STI.	1.Estructura de declaraciones condicionales y declaraciones de bucle. 2.Evaluación la rama de decla raciones en expresión. 3.Sintaxis de las declaraciones condicionales y de bucle. 4. Información sobre el material didáctico sobre el Lenguaje de programación.	STI para aprender Electrónica.
3. Gestión de conocimiento en el Módulo Experto del Sistemas Tutores Inteligentes. (2020)	**Redes bayesianas**	1.Mecanismos analítico y predictivo. 2.Estado de la actividad; la actividad de aprendizaje y la categoría del conocimiento	STI para el aprendizaje Electrónico.

Tabla 2 Análisis de las tres técnicas sobre el Módulo Experto

Las tres técnicas utilizadas han tenido su funcionalidad de acuerdo al problemas presentados en cada uno, sin embargo, su modelo de conocimiento es totalmente diferente a pesar de que hay dos STI que se basan en aprendizaje de la misma área de conocimiento, se puede deducir que la conformación del STI dependerá del entorno, lugar o situación del estudiante esto requiere un análisis en el contexto de aplicación del STI, se concluye que el verdadero desafío depende de eso, como el modelo que se puede implementar.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación, buscamos realizar una revisión enfocada en el Módulo Experto de un Sistema Tutor Inteligente, analizando las diferentes técnicas de aprendizaje y herramientas aplicadas de la inteligencia Artificial entendiendo que, dentro del módulo del experto existen diversas maneras de llegar a un objetivo, manteniendo un base de conocimiento concisa y puntual, con una base de conocimiento abundante, sin embargo se destaca que no hay investigación en este módulo, pareciese que todo se centra en el modelo del estudiante, sin embargo, el Módulo Experto es la base de conocimiento del STI, que también tiene su grado de dificultad ya que se considera que si el STI contiene material irracional, depende del módulo experto,

Dentro del módulo experto existen diversos conocimientos que el STI debe considerar, lo cual lo hace más completo hacer un modelo que se adapte a un estudiante que tenga un nivel de conocimiento básico, experto, competente o dominio sobre los temas de interés. No obstante, aún se continua con la investigación a profundidad sobre el módulo experto ya que dentro de este existen técnicas de representación de conocimiento como lo son: Sistemas basados en reglas, redes semánticas o frames, que en la actualidad están siendo utilizados, siendo este base sobre lo que trabajan las computadoras inteligentes y es importante entender los conceptos para su aplicación.

REFERENCIAS

La siguiente lista de referencias está constituida por artículos científicos, libros y revistas, las cuales aportan a esta investigación.

Altuna Enrique, Guibert Lisandra, Estrada Vivian (2014). *Method for the construction of the domain model in an Intelligent.* Editorial "Ediciones Futuro". Universidad de las Ciencias Informáticas. La Habana, Cuba

László Csépányi-Fürjes & Ghanim Hussein Ali Ahmed (2020). *Ontology domain model for e tutoring system. Journal of software engineering & intelligent systems. issn 2518-873.*

Beck, J., Stern, M., & Haugsiaa, E. (1996). *Applications of AI in Education*, https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/332148.332153
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

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.
Fatima-Zohra, Otman ABDOU, Khatir Haimoudi. (2020) Knowledge Management in the Expert Model of the Smart Tutoring System. : https://www.researchgate.net/publication/34148349

ISSN: 2992-8338

Modelo de calidad para determinar la granularidad de microservicios.

Ariel Martínez Roque *. Juan Carlos Rojas Pérez*.
Olivia Fragoso Díaz*. Humberto Hernández García*.
** Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.*

(e-mail: {m23ce052, juan.rp, olivia.fd, humberto.hg }@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: Microservices describe a particular way of designing software applications as independently deployable sets of services. One of the drawbacks of using microservices is their sizing: Difficulty in determining the appropriate size and/or level of granularity of the services to facilitate a design that fits the business logic, and at the same time, having the fewer possible dependencies. Services that are too detailed (fine-grained) increase the number of communications between them and, on the contrary, services that are less detailed (course-grained) are less scalable and modifiable. A microservice with inadequate granularity influences or affects, among other attributes, performance, scalability, modularity, reliability and security. In this work, a quality model is proposed that was obtained from the analysis of quality attributes and existing metrics in the literature. Through the model, it is intended that the user, when working with granularity, has a guide to the quality attributes and existing metrics related to granularity.

Keywords: Microservices, quality attributes, metrics, quality model, granularity.

1. INTRODUCCIÓN

Hace unos 20 años, la arquitectura orientada a servicios (SOA), los servicios web y la informática orientada a servicios (SOC) eran las palabras de moda del momento para muchos en el mundo empresarial. Hoy en día, somos testigos del mismo revuelo por un nuevo conjunto de palabras de moda: microservicios y arquitecturas de microservicios [1].

Los microservicios describen una forma particular de diseñar aplicaciones de software como conjuntos de servicios implementables de forma independiente. También se puede decir que no es más que "SOA bien hecho", ya que predican las mismas ventajas, como dinamismo, modularidad, desarrollo distribuido e integración de sistemas heterogéneos. Sin embargo, ahora la atención no se centra en la reutilización y la composición, sino en la independencia, la reemplazabilidad y la autonomía [1]. Según el sitio oficial de AWS [2] los microservicios son un enfoque arquitectónico y organizativo para el desarrollo de software donde el software está compuesto por pequeños servicios independientes que se comunican a través de API bien definidas. Los propietarios de estos servicios son equipos pequeños independientes.

Los servicios entonces se vuelven micro en términos de su contribución a la aplicación, no por sus líneas de código. Deben ser entidades que puedan concebirse, implementarse y desplegarse de forma independiente. Incluso pueden coexistir diferentes versiones y la topología real del sistema, se puede cambiar en tiempo de ejecución según sea necesario. Cada componente individual (microservicio) debe poder modificarse sin afectar el funcionamiento y el rendimiento de los demás[1].

El uso de nuevas arquitecturas de software para el desarrollo de sistemas de información conlleva también a retos que estas, por su "reciente" creación o uso, no pueden aplicar soluciones a problemas ya resueltos o abordados en otras arquitecturas. Una de las relativamente recientes arquitecturas utilizadas en el desarrollo de sistemas de software es la Arquitectura de Microservicios (MSA), de acuerdo con el trabajo [3] una MSA aboga por descomponer el monolito en un conjunto de pequeños servicios y hacer que se comuniquen entre sí a través de mecanismos ligeros. Descomponer un monolito en conjuntos pequeños de servicios es uno de los retos que afrontan las MSA actualmente.

La arquitectura de microservicio hace que las aplicaciones sean más fáciles de escalar y más rápidas de desarrollar. Esto permite la innovación y acelera el tiempo de comercialización de las nuevas características.

Con el hype y el creciente interés de las industrias de software en los microservicios, todavía hay una falta general de enfoques sistemáticos que modelen las decisiones de diseño de microservicios, incluida la decisión de los límites óptimos de los microservicios: el nivel óptimo de granularidad de los microservicios. [4]

Desde SOA se habla de los problemas que acarrea una granularidad inapropiada; según [5] algunos de los problemas que pueden surgir debido a una granularidad de servicio incorrecta son los siguientes:

- ✓ Duplicación de servicios (Diferentes servicios para tareas similares).
- ✓ Dificultad en el mantenimiento.
- ✓ La gobernanza del servicio es extremadamente difícil cuando la cantidad de servicios es enorme

ISSN: 2992-8338

y los servicios son simplemente interfaces de grano fino.
- ✓ La reutilización de servicios a través de aplicaciones se ve afectada, comprometiendo los principios básicos de SOA.
- ✓ La alineación entre el negocio y la tecnología se vuelve extremadamente difícil, lo que lleva a la redundancia dentro de las empresas.

Establecer la granularidad en un microservicio es un reto que ha sido y sigue siendo abordado en la actualidad. Según Alberto Gómez en [6] uno de los inconvenientes del uso de microservicios es el dimensionamiento de los mismos (service tailoring): Dificultad para determinar el tamaño y/o nivel de granularidad apropiado de los servicios para facilitar un diseño que se ajuste a la lógica de negocio, y al mismo tiempo, tener las menos dependencias posibles. Servicios demasiado detallados (fine-grained), aumenta el número de comunicaciones entre ellos y, por el contrario, servicios menos detallados (course-grained), son menos escalables y modificables. Un microservicio con una inadecuada granularidad influye o afecta entre otros atributos al rendimiento, escalabilidad, modularidad, fiabilidad y seguridad.
El problema de la granularidad ha sido abordado desde diversos enfoques. En el presente trabajo se aborda mediante un modelo de calidad para determinar la granularidad a partir del análisis de código estático en repositorios de microservicios. En la literatura existen trabajos que relacionan el comportamiento de la granularidad con atributos de calidad, pero relacionar estas características en un modelo de calidad puede constituir una nueva alternativa de solución para abordar el problema de granularidad.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

A continuación, se presenta un análisis de investigaciones que tratan el problema de la granularidad en microservicios y su influencia sobre los atributos de calidad.
En la literatura analizada se puede clasificar en 4 principales grupos: análisis de la granularidad en tiempo de diseño, en código estático, en tiempo de ejecución y mapeos sistemáticos. El análisis está orientado a encontrar atributos de calidad que son afectados por la granularidad, métricas para medirlos y sus correspondientes umbrales.

2.1. Análisis de la granularidad en tiempo de ejecución

En [4] se presenta Ambient-PRISMA Textual Language como un potencial lenguaje para definición de microservicios, concebido para realizar el cambio dinámico de la granularidad de los microservicios en tiempo de ejecución, es propuesto. Asimismo, se realiza una asignación dinámica de la granularidad de una aplicación basada en microservicios en tiempo de ejecución. La herramienta llamada Microservice Ambients establece las primitivas para adaptar los límites o boundaries. En este trabajo no se hace un análisis de la calidad de las divisiones hechas ni tienen en cuenta atributos de calidad.

En [7], Shadija et al., explora la granularidad del servicio; en la investigación se hace mención del potencial de este atributo de calidad para influir en la latencia de las aplicaciones. En este trabajo se compara el comportamiento del rendimiento de una aplicación basada en microservicios en cuatro escenarios posibles utilizando la herramienta Dynatrace (https://www.dynatrace.com). Cómo conclusiones de este trabajo se exponen que la latencia de una aplicación aumenta y como consecuencia disminuye el rendimiento al ser más granulares los microservicios que la componen. En este estudio se relaciona el atributo de calidad rendimiento con la granularidad, sin embargo, no aparecen bien definidas las métricas para medirlo, solamente se hacen pruebas en diferentes escenarios y se hacen comparaciones. Las pruebas en esta investigación se realizaron en tiempo de ejecución.
J.-P. Gouigoux y D. Tamzalit en [8] determinan la granularidad en tiempo de ejecución haciendo un balance entre las características costo del aseguramiento de la calidad y costo de despliegue. Tampoco aquí se analizan atributos de calidad ni métricas relacionadas. Además, es un trabajo basado en prueba y error de experiencias técnicas realizadas a una aplicación para descomponerla en microservicios.
Por otro lado en [9] se hace un análisis de granularidad para Funtion Block (Bloque de Funciones) como servicios. Para ello se sugiere utilizar un enfoque de cálculo de complejidad y gastos generales llamado Análisis de costos de granularidad del servicio (SGCA). La SGCA introduce dos funciones básicas, el Análisis de Costos de Descomposición de Servicios (SDCA) y el Análisis de Costos de Composición de Servicios (SCCA), que consideran el consumo de tiempo como un costo para penalizar los métodos de (des)composición de servicios utilizados. En este trabajo no se especifican métricas.

2.2. Análisis de la granularidad en tiempo de diseño

En el trabajo [10] Vera Rivera propone un modelo matemático para determinar la granularidad en microservicios en tiempo de diseño, basándose en historias de usuario. En este trabajo se definen atributos de calidad (complejidad, acoplamiento, cohesión) y se utilizan métricas obtenidas de la literatura consultada para la medición de estos atributos. El autor define la granularidad en microservicios como un vector compuesto por los valores obtenidos al aplicar las métricas adoptadas para cada uno de los atributos de calidad. En el trabajo no se especifican umbrales para las métricas que utilizan en el modelo, solamente hacen comparaciones de la granularidad entre aplicaciones basadas en microservicios.
En este mismo orden de ideas en [11] el autor propone una metodología para determinar granularidad en tiempo de diseño a partir de la especificación de casos de usos de la aplicación. En este trabajo solo se analiza el diseño de la aplicación por lo que no se hace un análisis de métricas al no necesitar analizar código fuente.

2.3. Mapeo sistemático de la literatura

ISSN: 2992-8338

Hassan et al. en [12] hace un mapeo sistemático de la literatura evaluando la transición de un monolito a una arquitectura de microservicios, aquí el autor define el término microservitización refiriéndose a la antes mencionada transición. Se plantea que uno de los problemas fundamentales de la transición a los microservicios es analizar su nivel de granularidad. En este trabajo también se hace un análisis de los atributos de calidad más recurrentes en la literatura analizada para razonar sobre la granularidad en microservicios (escalabilidad, rendimiento, mantenibilidad y fiabilidad). En este trabajo no se especifican métricas para medir los atributos de calidad expuestos.

2.4. Análisis de la granularidad en código estático.

Por su parte Al-Debagy y Martinek en [13] utilizan una versión modificada de la métrica de falta de cohesión de Henderson-Sellers, para que sea adecuada para el diseño de microservicios. En este caso las métricas son adaptadas para medir atributos de calidad como cohesión y complejidad. Se destaca de este artículo que se hace una medición de los atributos de calidad para valorar la posible descomposición de un microservicio en dependencia de los valores arrojados en el análisis de las métricas descritas en él. Las pruebas se realizan en repositorios de aplicaciones basadas en microservicios ya implementadas. A propósito en [14] los mismos autores presentan un marco de métricas para evaluar la calidad de los diseños de arquitectura de microservicios. Las métricas propuestas incluyen la Métrica de Granularidad de Servicio (SGM), Métrica de Falta de Cohesión (LCOM) y Número de Operaciones (NOO), que miden la granularidad, cohesión y complejidad de los microservicios individuales mediante el análisis de la interfaz de programación de aplicaciones (API). En este trabajo se proponen umbrales o valores óptimos para cada métrica aplicada. Algo similar hace Driessen en [15] con la diferencia que se evalúa la granularidad desde el punto de vista del atributo de calidad mantenibilidad. En el trabajo se hace un análisis de código estático teniendo en cuenta las diferentes versiones de una aplicación. En este último se utilizan métricas y umbrales descritos por Bogner et al. en [16]; en este trabajo [16] se utiliza el enfoque RAMA (RESTful API Metric Analyzer) para calcular las métricas de mantenibilidad utilizando APIs RESTful. El enfoque propone un análisis estático de las descripciones de API RESTful para calcular métricas estructurales relacionadas con la mantenibilidad del servicio. Continuando con [16] los autores determinan métricas de mantenibilidad relacionadas con la complejidad, la cohesión y el tamaño del servicio. Además, se diseñó un estudio de umbrales basado en cuartiles. Este estudio se basó en la recopilación de métricas de 1,737 APIs RESTful públicas para derivar umbrales de métricas en cuatro rangos: verde, amarillo, naranja y rojo.

En el análisis hecho se concluye que en la mayoría de los trabajos revisados no se detallan las métricas utilizadas [4] [7] [8] [9]; por otro lado en las que miden granularidad en tiempo de diseño, en [11] no se hace referencia a atributos de calidad ni a métricas relacionadas, en [10] el autor propone varias métricas basado en la literatura y otras adaptadas para el uso en microservicios, sin embargo, no define umbrales para dichas métricas. En el mapeo sistemático de la literatura consultado tampoco se mencionan o describen umbrales para las métricas expuestas. En relación a los trabajos en los que se mide granularidad en código estático [14] [13] [15] [16] sí se definen umbrales para las métricas utilizadas sobre todo basados en la literatura o haciendo adaptaciones de métricas utilizadas en la POO, sin embargo, carecen de un modelo de calidad donde se relacionen todos los elementos para determinar la granularidad en microservicios. En el presente trabajo se propone un modelo de calidad con las métricas y atributos de calidad que son afectados por la granularidad en microservicios. Es importante señalar que se utilizarán las métricas y umbrales propuestos en la literatura analizada.

3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En esta sección se describe un modelo de calidad para determinar granularidad en microservicios teniendo en cuenta el análisis y la especificación de cada una de las métricas utilizadas en la literatura.

3.1. Métricas a atributos de calidad relacionados con granularidad en microservicios

A partir del análisis de los artículos relacionados se describen a continuación una selección de métricas propuestas en la literatura con sus fórmulas utilizadas para medir atributos de calidad relacionados con la granularidad en microservicios. Cabe destacar que en la **Tabla 1** solamente se muestran las métricas para las cuales están propuestas fórmulas que permiten calcularlas en aplicaciones basadas en microservicio. Es importante mencionar que muchas de estas son adaptaciones de métricas utilizadas en el paradigma orientado a objetos.

Tabla 1. Atributos de calidad y métricas

Atributo de Calidad	Métrica	Fórmula
Acoplamiento	*AIS* [10]	$= \sqrt[2]{AIS_1^2 + AIS_2^2 + \cdots + AIS_n^2}$ **AIS:** Número de otros microservicios que invocan al menos una operación de la interfaz de un microservicio
	ADS [10]	$= \sqrt[2]{ADS_1^2 + ADS_2^2 + \cdots + ADS_n^2}$ **ADS:** Número de otros microservicios de los que depende el microservicio
	SIY[10]	$= \sqrt[2]{SIY_1^2 + SIY_2^2 + \cdots + SIY_n^2}$ **SIY:** Número de pares de microservicios interdependientes
	CpT [10]	$= \sqrt[2]{AisT^2 + AdsT^2 + SiyT^2}$

ISSN: 2992-8338

Atributo de Calidad	Métrica	Fórmula
Granularidad	*WSIC*[10] [15]	$= Max(WSIC_1, WSIC_2, \dots, WSIC_n)$ **WSIC:** número de operaciones de interfaz expuestas del microservicio
	DGS[14]	$= \frac{IPR}{\sum_{i=1}^{n} FP} + \frac{OPR}{\sum_{i=1}^{n} CP}$ **DGS:** Granularidad de Datos de un Servicio. **IPR:** Cantidad de parámetros de entrada en una operación. **FP:** Total de parámetros de entrada en un microservicio. **OPR:** Cantidad de parámetros de salida en una operación. **CP:** Total de parámetros de salida en un microservicio.
	FGS[14]	$= \frac{OT}{\sum_{i=1}^{n} O}$ **FGS:** Granularidad Funcional de un Servicio. **OT:** Peso para una operación específica. **O:** Suma de todos los pesos de las operaciones en un microservicio.
	SGM[14]	$= \sum_{i=1}^{n} DGS * FGS$ **SGM:** Métrica Granularidad de un Servicio.
Rendimiento	*Avg.Calls* [10]	$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} Calls_i$ **Calls:** número de invocaciones de ms_i a otros microservicios **n:** número de microservicios
Complejidad	*NOO*[13] [14]	$= \sum_{i=1}^{n} M$ **NOO:** Número de Operaciones
Cohesión	*LCOM*[14]	$= 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} MF}{M * F}$ **LCOM:** Falta de Cohesión
Cohesión	*SIDC(S)* [15]	$= \frac{OC(IS)}{OD(IS)}$ **SIDC:** Cohesión de datos de Interface de Servicio **OC(IS):** Número de operaciones de que tienen al menos un tipo de datos de parámetro en común.
		OD: Número total de operaciones discretas definidas. **IS:** Interface de servicio.

3.2. Taxonomía

Teniendo en cuenta la literatura revisada se presenta en la Figura 1 una taxonomía donde se relacionan los atributos de calidad más abordados por los autores consultados y sus correspondientes métricas relacionadas. En esta imagen se pueden observar las métricas y atributos de calidad que sirven de base al modelo de calidad propuesto en la presente investigación.
Para la selección se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

1- Las métricas deberán ser medibles en código fuente estático sin necesidad de la documentación del proyecto.
2- Las métricas deberán tener umbrales definidos.
3- La relación con la granularidad debe estar demostrada en los trabajos relacionados.

En la taxonomía se presentan métricas propuestas en [14] para medir la granularidad como atributo de calidad estas son ***SGM****(Métrica Granularidad de un Servicio),* ***DGS****(Granularidad de Datos de un Servicio),* ***FGS****(Granularidad Funcional de un Servicio),* ***IPR****(Cantidad de parámetros de entrada en una operación),* ***FP****(Total de parámetros de entrada en un microservicio),* ***OPR****(Cantidad de parámetros de salida en una operación),* ***CP****(Total de parámetros de salida en un microservicio),* ***OT****(Peso para una operación específica),* ***O****(Suma de todos los pesos de las operaciones en un microservicio)*. Según Al-Debagy y Martinek en [14] para el caso de la métrica ***OT*** las operaciones de creación tienen un peso de 4, las operaciones de actualización tienen un peso de 3, las operaciones de eliminación tienen un peso de 2 y las operaciones de lectura tienen un peso de 1, es importante señalar que esta es una propuesta de los autores. Por otro lado, se muestran los atributos de calidad que se relacionan a la granularidad de microservicios. Para la medición de estos atributos se proponen varias métricas en la literatura las cuales están descritas en la **Tabla 1**.

ISSN: 2992-8338

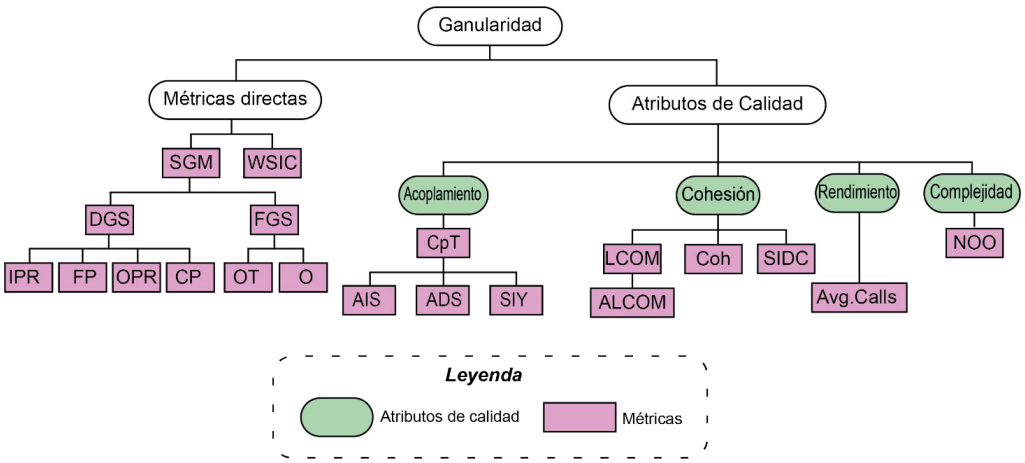


Figura 1. Taxonomía de atributos de calidad y métricas relacionadas con la granularidad en microservicios

4. MODELO DE CALIDAD

Teniendo en cuenta la taxonomía presentada a partir de la búsqueda y análisis de las métricas en la literatura y atendiendo a los aspectos expuestos en la sección 3.2 para la selección de atributos de calidad; en la Figura 2 se presenta un modelo de calidad para determinar la granularidad en microservicios. El modelo tiene como objetivo calcular las métricas propuestas, seleccionando aquellas que aplican para la presente investigación según los criterios de selección definidos en la sección 3.2.

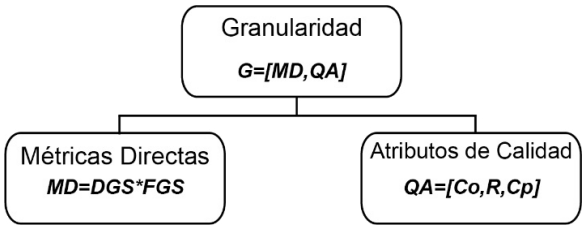


Figura 2. Modelo de calidad para determinar la granularidad en microservicios

4.1. Especificación del modelo de calidad

El modelo de calidad especificado en la Figura 2, que se complementa con la taxonomía presentada en Figura 1 y la relación de atributos y métricas presentada en la Tabla 1, tiene como fin determinar la granularidad de microservicios (G) a través de su relación con atributos de calidad Cohesión (Co), Rendimiento (R) y Complejidad (Cp). Según la bibliografía consultada [7], [10], [14], [15], [17], [18], [19] la granularidad tiene influencia directa en los atributos antes mencionados. Se espera que un grano más fino (valores de G más cercanos a 1) afecta el rendimiento de la aplicación debido a un mayor número de llamadas entre las partes (servicios) que componen la aplicación. Por otro lado, un grano más grueso (valores de G más cercanos a 0) aumenta la complejidad de los servicios que componen una aplicación basada en microservicios. Además, en la literatura se afirma que un grano más grueso puede afectar la cohesión de los microservicios de una entidad de software [14] [10] [15] [13].

Para la medición de los atributos de calidad propuestos en el modelo se tendrán en cuenta las siguientes métricas.

Para el caso de Cohesión (Co):

- LCOM (Falta de cohesión) propuesta en [14] y que según el estudio hecho en este trabajo se define como umbral de esta métrica valores entre 0 y 0.8.
- SIDC (Cohesión de datos de Interface de Servicio) propuesta en [15] para la cual se define valores de en aceptación o umbrales de 0.64 a 1.

Para el rendimiento (R):

- Avg. Calls (Promedio invocaciones de un microservicio a otros microservicios en una aplicación) propuesta en [10]. En el caso de esta métrica no se encontraron valores de aceptación o umbrales por lo que se atenderá su comportamiento a medida que varíe la granularidad (G).

Para la complejidad (Cp):

- NOO (Número de operaciones) propuesta en [14] y los autores definen hasta 10 el numero de operaciones como umbral de esta métrica

Métricas directas (MD)

Por otro lado en [14] se proponen métricas para calcular directamente la granularidad como atributo de calidad, ***DGS****(Granularidad de Datos de un Servicio)* y ***FGS****(Granularidad Funcional de un Servicio);* dichas métricas se multiplican y, atendiendo a los resultados obtenidos en diferentes aplicaciones basadas en microservicios, los autores definieron como umbral para Granularidad (en el caso de la presente investigación Métricas Directas) valores entre 0.2 y 0.6.

ISSN: 2992-8338

En el caso del presente modelo de calidad se utilizan estas métricas y se clasifican como métricas directas con respecto a la granularidad en microservicios.
Atendiendo a las métricas encontradas y sus valores de aceptación (umbrales) el modelo de calidad ayuda a tomar unas decisiones sobre la granularidad a partir de un balance de los atributos de calidad propuestos en el modelo de calidad.

5. CONCLUSIONES

El estudio de la literatura consultada permitió identificar que la mayoría de las métricas propuestas son adaptaciones de métricas definidas en arquitecturas previas a la de servicios un proceso de y no presentan la definición o adaptación de estas; en cuanto a los umbrales algunas de estas no presentan y las que presentan carecen de las pruebas necesarias para su completa aceptación. A pesar de esto fueron identificados atributos de calidad relacionados con la granularidad en microservicios, métricas y umbrales; algunos de estos trabajos fueron probados en aplicaciones reales, lo que proporciona una base teórica para el desarrollo del modelo de calidad propuesto. El trabajo brinda un enfoque integral para abordar el problema de la granularidad en microservicios, teniendo en cuenta aspectos de calidad. La propuesta del modelo de calidad constituye una herramienta para determinar granularidad en microservicios a partir de la medición de atributos de calidad mediante métricas propuestas en la literatura.

6. TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda probar el modelo de calidad para su validación en aplicaciones basadas en microservicios. Se recomienda, además, la utilización de una herramienta que permita la recolección automática de las métricas en microservicios como una alternativa para conseguir analizar un mayor número de repositorios de microservicios. Actualmente se trabaja en la implementación de una herramienta para automatizar la recolección de los datos correspondientes a cada una de las métricas que forman parte del modelo de calidad propuesto.

REFERENCIAS

[1] L. Baresi y M. Garriga, «Microservices: The Evolution and Extinction of Web Services?», en *Microservices: Science and Engineering*, A. Bucchiarone, N. Dragoni, S. Dustdar, P. Lago, M. Mazzara, V. Rivera, y A. Sadovykh, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 3-28. doi: 10.1007/978-3-030-31646-4_1.
[2] «¿Qué son los microservicios? | AWS», Amazon Web Services, Inc. Accedido: 6 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://aws.amazon.com/es/microservices/
[3] S. Li *et al.*, «Understanding and addressing quality attributes of microservices architecture: A Systematic literature review», *Inf. Softw. Technol.*, vol. 131, p. 106449, mar. 2021, doi: 10.1016/j.infsof.2020.106449.
[4] S. Hassan, N. Ali, y R. Bahsoon, «Microservice Ambients: An Architectural Meta-Modelling Approach for Microservice Granularity», abr. 2017. doi: 10.1109/ICSA.2017.32.
[5] N. Kulkarni y V. Dwivedi, «The Role of Service Granularity in a Successful SOA Realization A Case Study», en *2008 IEEE Congress on Services - Part I*, jul. 2008, pp. 423-430. doi: 10.1109/SERVICES-1.2008.86.
[6] E. Albertos Gómez, «Arquitecturas software para microservicios: una revisión sistemática de la literatura», masters, E.T.S.I de Sistemas Informáticos (UPM), 2018. Accedido: 27 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/51460/
[7] D. Shadija, M. Rezai, y R. Hill, «Microservices: Granularity vs. Performance», en *Companion Proceedings of the10th International Conference on Utility and Cloud Computing*, Austin Texas USA: ACM, dic. 2017, pp. 215-220. doi: 10.1145/3147234.3148093.
[8] J.-P. Gouigoux y D. Tamzalit, «From Monolith to Microservices: Lessons Learned on an Industrial Migration to a Web Oriented Architecture», presentado en IEEE International Conference on Software Architecture Workshops, 2017, pp. 62-65. doi: 10.1109/ICSAW.2017.35.
[9] A. Homay, A. Zoitl, M. de Sousa, M. Wollschlaeger, y C. Chrysoulas, «Granularity Cost Analysis for Function Block as a Service», jul. 2019, p. 1204. doi: 10.1109/INDIN41052.2019.8972205.
[10] F. H. Vera Rivera, «Modelo inteligente de especificación de la granularidad de aplicaciones basadas en microservicios.», Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2021. Accedido: 19 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/19567
[11] C. Merino Ibanez, «Metodología en la determinación de la granularidad de un Microservicio», CENIDET, Cuernavaca, México, 2023. Accedido: 27 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/4961
[12] S. Hassan, R. Bahsoon, y R. Kazman, «Microservice Transition and its Granularity Problem: A Systematic Mapping Study». arXiv, 2019. doi: 10.48550/arXiv.1903.11665.
[13] O. Al-Debagy y P. Martinek, «Extracting Microservices' Candidates from Monolithic Applications: Interface Analysis and Evaluation Metrics Approach», en *2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)*, jun. 2020, pp. 289-294. doi: 10.1109/SoSE50414.2020.9130466.
[14] O. Al-Debagy y P. Martinek, «A Metrics Framework for Evaluating Microservices Architecture Designs», *J. Web Eng.*, vol. 19, n.º 3–4, pp. 341-370, jun. 2020, doi: 10.13052/jwe1540-9589.19341.
[15] F. Driessen, «A quantitative assessment method for microservices granularity to improve maintainability».
[16] J. Bogner, S. Wagner, y A. Zimmermann, *Collecting Service-Based Maintainability Metrics from*

ISSN: 2992-8338

RESTful API Descriptions: Static Analysis and Threshold Derivation. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-59155-7_16.

[17] T. de Oliveira Rosa, J. F. L. Daniel, E. M. Guerra, y A. Goldman, «A Method for Architectural Trade-off Analysis Based on Patterns: Evaluating Microservices Structural Attributes», en *Proceedings of the European Conference on Pattern Languages of Programs 2020*, en EuroPLoP '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, dic. 2020, pp. 1-8. doi: 10.1145/3424771.3424809.

[18] M.-D. Cojocaru, A. Uta, y A.-M. Oprescu, «Attributes Assessing the Quality of Microservices Automatically Decomposed from Monolithic Applications», en *2019 18th International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC)*, Amsterdam, Netherlands: IEEE, jun. 2019, pp. 84-93. doi: 10.1109/ISPDC.2019.00021.

[19] H. Vural, M. Koyuncu, y S. Misra, «A Case Study on Measuring the Size of Microservices», jul. 2018, pp. 454-463. doi: 10.1007/978-3-319-95174-4_36.



SISTEMAS SOCIOAMBIENTALES Y SUSTENTABILIDAD

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Agrovoltaic parks: An alternative for energy sustainability in the state of Morelos

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: Within the framework of global actions to mitigate the effects of the crisis, energy and climate the initiative of agrovoltaic parks arises, defined as the use of land both to produce photovoltaic energy and to carry out agricultural and livestock activities thanks to the installation of solar panels. In this sense, in Mexico, studies have been carried out in rural communities such as those located in Morelos and based on this initiative, an analysis of its viability is proposed. This is why a documentary- type is proposed, where the results have indicated that for the state of Morelos the generation of electrical energy from solar energy is viable due to its geographical location and climate conditions. According to research data, up to 800 watts/m² can be produced on a sunny day by adapting devices that transform solar energy into electrical energy.

.*Keywords:* Agrovoltaic parks, solar panels, feasibility, electrical energy.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar se ha convertido en un referente importante de generación de energía eléctrica en las comunidades rurales. 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. La instalación de estos paneles solares permite a las comunidades rurales en México tener la disponibilidad de energía eléctrica de una manera confiable y asequible, y con ello no limitar el desarrollo económico y social de las comunidades, con lo cual se impulsa la calidad de vida de los habitantes de estas comunidades.

Actualmente y como una alternativa sustentable, se está promoviendo un concepto de parque “agrovoltaico” 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, dándole al terreno un doble propósito y haciéndolo más productivo.

En este trabajo, se presenta una propuesta para indicar que localidades son las más aptas para la instalación de parques solares agrovoltaicos en el estado de Morelos, proporcionando una alternativa viable para generar energía limpia y sostenible a las comunidades rurales.

1.1 Antecedentes

El término agrovoltaico surge en el año 1982 en el marco de los estudios realizados por Adolf Goetzberger, fundador del Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE [1]. A partir de sus investigaciones logró crear un proceso donde se integraban la agricultura, ganadería o apicultura con la energía solar utilizando celdas solares (paneles solares), aumentando así el aprovechamiento de la tierra beneficiando a la economía de las comunidades rurales. Esta idea comienza a despertar mayor interés luego de la expansión de las energías renovables y porque también se lograron determinar las condiciones necesarias para la investigación, desarrollo, difusión e implementación de las tecnologías agrovoltaicas.

En la Figura 1, se puede evidenciar la integración entre el sistema fotovoltaico y la agricultura en un campo de cultivo en Francia. Por ejemplo, en este tipo de instalaciones se puede combinar el cultivo de algunas plantas bajo las estructuras donde se soportarán los paneles solares, disminuyendo el estrés en las plantas producto de las elevadas temperatura actuales y/o el granizo o exceso de agua en algunas otras temporadas, esto traería como consecuencia el ahorro de suministro de agua para el riego de las plantas, mejorando las cosechas y a su vez generar “energía limpia”.

ISSN: 2992-8338



Figura 1. Francia: Agrupación de paneles solares. Fuente de Imagen: https://www.greencm.uk.com/prensa-2009-2020/

2. PARQUES FOTOVOLTAICOS EN MÉXICO

2.1. Proyectos Nacionales

México ha desarrollado importantes proyectos en el marco de la energía solar, entre estos se destaca el más grande de América Latina y el Caribe nombrado como "Parque Solar Villanueva" que se encuentra ubicado en Viesca con una capacidad instalada de 828 MW, inaugurada en el año 2018. Fue diseñada y construida por Enel Green Power México (EGPM) con una inversión de $710 millones en su construcción estructurada en más de 2,5 millones de paneles solares fotovoltaicos con una capacidad de generación de 2.000 GWh de energía anuales de manera limpia pues se evita la emisión de más de 1 millón de toneladas de dióxido de carbono al año [2].

A partir de esa iniciativa, se ubica en la vanguardia de innovación el estado de Sonora, estado que actualmente cuenta con un total de 8 parques fotovoltaicos con la capacidad de generar 774 MW, mientras que Coahuila de Zaragoza cuenta con cuatro proyectos que generan 949 MW. Otros Estados con presencia de parques solares que generan energía eléctrica a las redes de transmisión son Nayarit, Jalisco, Colima y Guanajuato (con cuatro parques solares de 299 MW de potencia instalada), en menor medida, Zacatecas, Michoacán, San Luis de Potosí, Querétaro, Ciudad de México, Morelos y Guerrero [3].

Asimismo, el Proyecto Solar Fotovoltaico Puerto Libertad, ubicado en Sonora, es uno de los más grandes de su tipo en América Latina. Su potencia máxima es de 405 MW, lo que equivale a 317,5 MW nominales. La primera y segunda fase del parque albergan 11,223 módulos solares, que entrarán en funcionamiento en julio y diciembre del año 2023 [3].

Considerando el uso de parques solares y el aprovechamiento de los terrenos para la agricultura, es importante destacar que uno de los proyectos agrovoltaicos de gran importancia en México es el de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ubicado en Ciudad de México donde se ha conformado un centro de investigación sobre sistemas agrovoltaicos integrados con tecnologías de riego desde el año 2018 con financiamiento interno y algunas subvenciones de tipo gubernamental, la conformación de las instalaciones se puede ver en la Figura 2.



Figura 2. Parque Agrovoltaico UNAM. Centro de Enseñanza Práctica e Investigación en Producción y Salud Animal, CEPIPSA, Topilejo, Tlalpan, CDMX.

2.2. Financiamiento de Proyectos Agrovoltaicos en México

Existen diferentes tipos de financiamiento para los proyectos de energía fotovoltaica y la selección depende de características y necesidades de cada uno, los más comunes son el financiamiento bancario y colectivo. En ese sentido, en México también existe una variedad que abarca desde la inversión gubernamental (proporcionada por el gobierno federal, estatal o municipal) y el privado. Dentro de cada categoría, existen una variedad de programas de financiamiento específicos disponibles. Algunos de los programas de financiamiento gubernamental más populares para la energía fotovoltaica en México incluyen: Fondos de la Secretaría de Energía (SENER), Programa de Subsidios para el Ahorro de Energía (PROSAE) y Programa de Electrificación Rural (PER), este último está orientado hacia la electrificación de comunidades rurales, incluyendo la instalación de sistemas fotovoltaicos [4].

El tipo de financiamiento más adecuado para un proyecto de energía fotovoltaica dependerá de una variedad de factores, entre los cuales se incluyen el tamaño del proyecto, el presupuesto del proyecto y la capacidad de pago del solicitante.

En México, el Centro de Estudios de la Competitividad y la Tecnología de la Energía (CECTEI), ofrece asesoría técnica, económica y legal para la elaboración y gestión de proyectos fotovoltaicos. Además, el CECTEI cuenta con el apoyo de diversas instituciones gubernamentales, como la Secretaría de Energía, la Comisión Federal de Electricidad y el Fondo Nacional de Infraestructura, que facilitan el acceso a recursos financieros y a incentivos fiscales para los proyectos fotovoltaicos [4].

ISSN: 2992-8338

2.3. Valoración de la factibilidad técnica y económica para la instalación de proyectos de parques agrovoltaicos en el estado de Morelos

El estado de Morelos, ubicado en el centro de México, presenta un alto potencial para la instalación de parques agrovoltaicos debido a su clima soleado y a la disponibilidad de tierras agrícolas. Sin embargo, es importante realizar una valoración de la factibilidad técnica y económica de estos proyectos antes de su implementación, considerando inicialmente el estudio técnico sobre el potencial de generación. En la Figura 3, se muestra un mapa que muestra el potencial de generación de energía eléctrica en el estado de Morelos considerando el uso de sistemas fotovoltaicos.

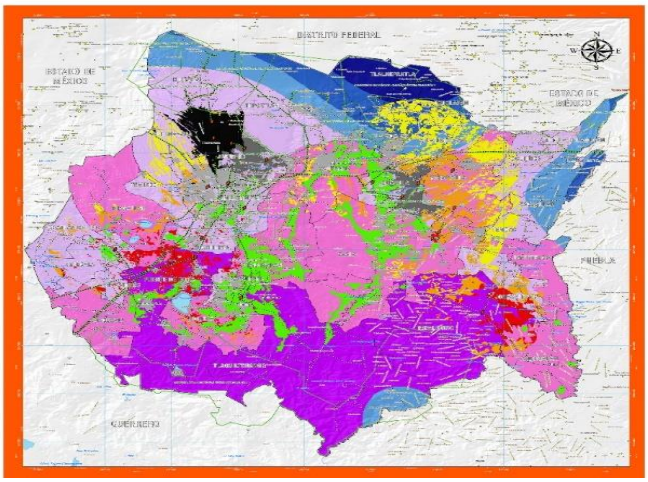


Figura 3. Mapa de potencial de generación de energía eléctrica en el estado de Morelos.

Según datos de la secretaría de desarrollo sustentable del estado de Morelos, las comunidades de este estado con mayor irradiación solar global Wh/m^2 son: Puente de Ixtla, Jojutla, Mazatepec, Tetecla y Jonacatepec [5]. Se estima que la radiación solar promedio en Morelos es de 6.5 kWh/m^2 por día, lo que lo convierte en un lugar ideal para la instalación de paneles solares. Además, cuenta con una superficie agrícola de 461,000 hectáreas, de las cuales alrededor del 10% podría ser utilizada para la instalación de parques agrovoltaicos sin afectar la producción agrícola [6].

Con respecto a la infraestructura eléctrica, el estado de Morelos cuenta con una red eléctrica bien desarrollada. Sin embargo, es necesario realizar inversiones en la infraestructura de transmisión y distribución para que las comunidades rurales se beneficien de este servicio que en ocasiones resulta inaccesible para algunas regiones en particular [6].

En cuanto a la compatibilidad de los cultivos, los paneles solares pueden proporcionar sombra y protección contra el viento a los mismos, lo que puede mejorar su rendimiento. Sin embargo, es importante seleccionar los cultivos adecuados y diseñar proyectos agrovoltaicos de manera que no se obstaculice el crecimiento de las plantas. En la Figura 4, se presenta el modelo CANVAS para la instalación de parques agrovoltaicos en comunidades rurales del estado de Morelos.

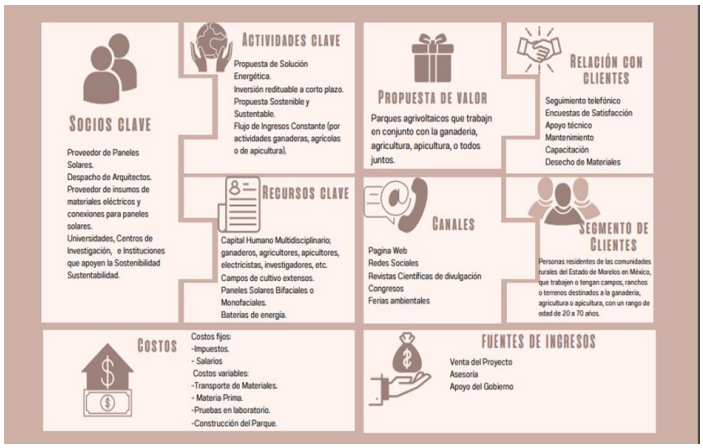


Figura 4. Modelo CANVAS.

La propuesta de valor o ventaja competitiva que presentan los proyectos agrovoltaicos se basa en el doble aprovechamiento de los terrenos donde pueden ser instalados estos parques, ya que la idea de estos proyectos es generar energía eléctrica en conjunto con la ganadería, agricultura, apicultura o todos juntos, además, la energía eléctrica generada por los paneles solares se puede ocupar para deshidratación de alimentos, purificación y bombeo de agua, abastecimiento de energía para el hogar, entre muchas otras opciones.

Con respecto a la factibilidad económica, se requiere de un costo de inversión inicial, algunas referencias indican para un parque parque agrovoltaico en el estado de Morelos podría oscilar entre 100,000 y 200,000 pesos mexicanos por MWp; mientras que los costos operativos y de mantenimiento son relativamente bajos, y podrían oscilar entre 5,000 y 10,000 pesos mexicanos por MWp anuales [6].

Tal como puede notarse, la instalación de parques agrovoltaicos en el estado de Morelos es técnicamente viable y económicamente atractiva. Los parques agrovoltaicos ofrecen una serie de beneficios, como la producción de energía limpia, la mejora de la eficiencia del uso del suelo y la protección de los cultivos contra las inclemencias del tiempo.

El gobierno mexicano ofrece además una serie de incentivos para la instalación de parques agrovoltaicos, lo que hace que esta tecnología sea aún más atractiva para los inversionistas o interesados, por ejemplo, a través del SECTEI se puede postular un proyecto agrovoltaico en el marco de las convocatorias para presentar proyectos científicos, de desarrollo tecnológico e innovación y divulgación [7].

También se puede considerar la Red Girasol que es una plataforma de fondeo colectivo que conecta inversionistas con personas que desean financiar proyectos de energías limpias y

ISSN: 2992-8338

sustentables como: proyectos fotovoltaicos y abastecimiento de energía eléctrica. Esta red se encarga de lograr el financiamiento, fondeo, e instalación de paneles solares, sin necesidad de inversión inicial, ya que se maneja mediante un crédito, mismo que es evaluado en distintos aspectos e incluso cuentan con su propio simulador con acceso web, el cual se puede ver en la Figura 5 [8].

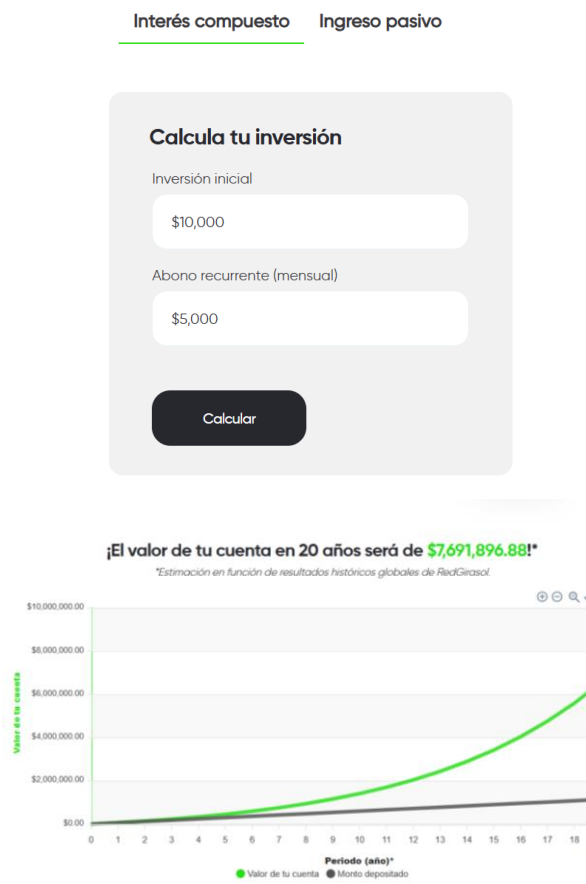


Figura 5. Simulador para el financiamiento de proyectos de sostenibilidad.

3. PLAN DE SEMBRADO

La implementación de un proyecto agrovoltaico en el estado de Morelos representa una oportunidad viable desde el punto de vista económico y de riesgo. Para ello podemos planear un plan de sembrado de cultivos agrupando las plantas con requerimientos similares de agua, luz, nutrientes y espacio, para optimizar el uso de los recursos y facilitar el manejo del huerto.

Se pueden sembrar juntas las hortalizas de hoja verde, como lechuga, espinaca y acelga, que necesitan riego frecuente y sombra parcial. Otra opción es sembrar juntas las leguminosas, como frijol, haba y chícharo, que fijan nitrógeno al suelo y lo enriquecen. También se pueden sembrar juntas las plantas aromáticas, como albahaca, orégano y tomillo, que repelen plagas y atraen polinizadores. Entonces el plan de sembrado de acuerdo a las similitudes del cultivo permite aprovechar mejor el espacio disponible, mejorar la salud de las plantas y obtener mayores cosechas.

Ademas, puede tambien haber una coexistencia de los cultivos con animales de granja. A continuación, en la Figura 6, se presenta un plan de sembrado para varios cultivos que son endémicos del estado de Morelos y que pueden fácilmente integrarse en el proyecto.

Considerando lo anteriormente señalado se estructura un plan de sembrado bajo el esquema mixto (ganado-cultivo). Para su ubicación se propone un diseño tipo plano o parral para la instalación agrovoltaica, aprovechando al máximo la luz solar y el espacio disponible.

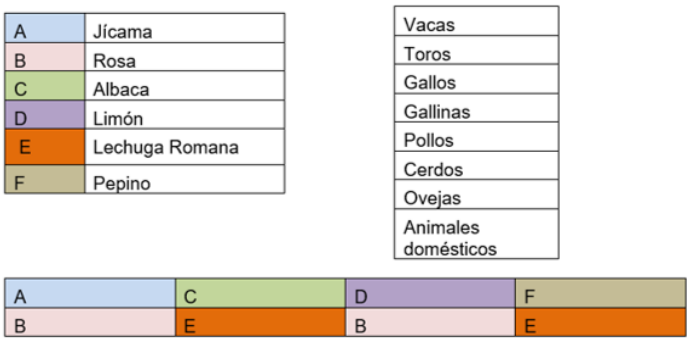


Figura 6. Propuesta de plan de sembrado para uso agrícola y ganadero para la estación de primavera que inicia el 21 de marzo y finaliza el 20 de junio.

Un diseño agrovoltaico en forma de “parral" está compuesto por dos elementos básicos: una estructura vertical y otra horizontal. La estructura vertical está constituida por soportes rígidos que se pueden diferenciar según sean perimetrales o interiores. La estructura horizontal (plana) flexible está constituida por dos mallas de alambre galvanizado superpuestas, tejidas manualmente de forma simultánea a la construcción del invernadero y además de formar parte de la estructura del invernadero, sirven para sostener y sujetar la lámina plástica [9].

En cuanto a la instalación de los paneles solares, estos se pueden instalar en dos filas paralelas, formando una "L". La separación entre paneles debe ser de 5 a 7 metros, permitiendo el paso de maquinaria agrícola y la circulación de animales. Debajo de estos paneles se puede proponoer la siguiente distribución:

Cultivos sugeridos: En el área central de la "L", donde hay mayor incidencia de luz solar, se siembran cultivos que requieren más luz, como frutales (manzanos, perales, duraznos, ciruelos, higos, uvas). En las áreas sombreadas por los paneles, se siembran cultivos tolerantes a la sombra parcial, como hortalizas (tomates, pimientos, berenjenas, lechugas, espinacas, acelgas) o leguminosas (frijoles, lentejas, garbanzos).

ISSN: 2992-8338

Áreas de Pastoreo: Las áreas sombreadas por los paneles solares se utilizarían como zonas de pastoreo para pollos. La sombra proporcionada por los paneles ayuda a regular la temperatura corporal de los animales y reduce el estrés por calor.

Gallinero: Construir un gallinero en un área protegida del viento y la lluvia, donde los pollos puedan refugiarse, descansar y poner huevos.

Cercas: Se deben instalar cercas alrededor del área de pastoreo para delimitar el espacio donde los pollos pueden moverse libremente y evitar que dañen los cultivos.

Acceso al agua y riego: Se recomienda instalar bebederos para garantizar que los pollos tengan acceso a agua fresca y limpia en todo momento. Para el disminuir riesgo, se sugiere implementar un sistema de riego por goteo para optimizar el uso del agua y evitar el exceso de humedad en el suelo, lo que podría afectar la salud de los pollos y de los cultivos.

Control de malezas: Se debe realizar un control manual o mecánico de las malezas para evitar la competencia por nutrientes y la proliferación de plagas.

Nutrición y Salud Animal: Se proporciona a los pollos una alimentación adecuada a sus necesidades nutricionales, utilizando una combinación de alimentos comerciales y pastoreo en las áreas sombreadas. Se implementan medidas preventivas de sanidad animal para mantener la salud de los pollos y evitar enfermedades. Se realiza un monitoreo constante de su estado y se aplican las vacunas necesarias.

La combinación de agricultura, energía solar y animales de granja, en nuestro caso y por factibilidad consideramos pollos en un sistema agrovoltaico en el estado de Morelos ofrece una oportunidad viable para crear un modelo productivo y sostenible. La selección adecuada de cultivos, el diseño eficiente de la instalación agrovoltaica, el manejo adecuado del sistema y la implementación de medidas de sanidad animal son claves para el éxito de este proyecto.

6. CONCLUSIONES

Los sistemas de energía solar aprovechan la radiación solar para producir electricidad, calor o agua caliente. Existen diferentes tipos de sistemas de energía solar según el uso que se les dé y la forma en que transforman la energía solar. En México se cuenta con las condiciones climáticas, geográficas y la tecnología para aprovechar este recurso y captar la energía solar para generar energía eléctrica, este recurso energético puede utilizarse para la deshidratación de cultivos, mismos que crecen bajo el parque fotovoltaico, y tambien es posible tener instalaciones de purificación y saneamiento de agua, entre otros posibles usos.

En el estado de Morelos se pueden implementar este tipo de sistemas, debido a las condiciones geograficas y climáticas, lo cual convierten a este estado en un gran candidato para poder implementar este tipo de tecnologías en los municipios o localidades alejadas de las redes de distribución eléctricas. Su instalación lograría generar una producción de energía eléctrica de autoconsumo que aprovechará una superficie de terreno y labores en conjunto de ganadería y agricultura optimizando al máximo la superficie de los terrenos teniendo un doble o hasta triple beneficio económico y aportando al desarrollo sustentable del planeta.

Mediante la instalación de este tipo de parques se obtendrían beneficios económicos importantes para cualquier empresa y/o comunidad impulsando el desarrollo tecnológico. Es importante considerar esquemas de siembras como el de tipo “parral” o algún otro, que permitan maximizar el beneficio del terreno y del área efectiva del proyecto.

Entre los beneficios esperados por la implementación de este proyecto, destacan: la producción de energía solar limpia, ya que los paneles solares generan energía renovable y sostenible para el consumo de la granja o para su venta a la red eléctrica; una mejora de la productividad agrícola debido a que la sombra parcial proporcionada por los paneles solares puede beneficiar a algunos cultivos, aumentando su rendimiento; una fertilización natural, esto debió a que los pollos producen estiércol que puede ser utilizado como fertilizante natural para los cultivos, reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos y finalmente un control mas efectivo de plagas, ya que los pollos pueden ayudar a controlar plagas de insectos en los cultivos, actuando como depredadores naturales.

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 SNII-CONAHCyT.

REFERENCES

[1] W. Marrou, « How does a shelter of solar panels influence wáter flows in a soil–crop system?,» *Eur J Agron,* 2013.

[2] A. El Mekaoui, O. Baños, I. Herrera y R. Chaparro, «Megaproyectos de energías renovables: Reflexiones y problemáticas desde los medios de comunicación impresos y virtuales en el estado de Yucatán, México,» *Ingeniería,* vol. Vol. 23 (1) , nº 75-92.

[3] «Energía Estratégica, «México alcanza los 50 parques fotovoltaicos operativos de gran escala: suman 4549 MW de potencia solar instalada,» pp. https://www.energiaestrategica.com/mexico-alcanza-los-50-parques- fotovoltaicos-operat, 2019.».

[4] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SENAMERT), «Guía de Programas de Fomento de Energías Renovables,» *https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/100491/*

ISSN: 2992-8338

GuiaProgramasFomentoEnergiasRenovablesMunicipios RepublicaMexicana.pdf.

[5] SEMARMET, «Programa de Gestión para mejorar la Calidad del Aire en Morelos (2018-2027),» *https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/323929/30_ProAire_Morelos.pdf.*

[6] Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación, «https://www.sectei.cdmx.gob.mx/».

[7] RedGirasol, «Descubre cuánto puedes ganar,» *https://www.redgirasol.com/.*

[8] Nacional Financiera para Proyectos Fotovoltaicos, «Brinda NAFIN financiamiento sustentable para el uso eficient de energía eléctrica,» *https://www.nafin.com/portalnf/content/sobre-nafin/sala-de-prensa/boletin_027_18.html.*

ISSN: 2992-8338

Literature review on machine learning applied to yield prediction in crop planting

Andrés De-León-Castrejón* / *. Hugo Estrada-Esquivel*. Alicia Martínez-Rebollar*. David H. Noriega Cantú**. Arturo Ernesto Mares Gardea*.**

** TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.*

(e-mail: {d23ce165, hugo.ee, alicia.mr, arturo.mg}@cenidet.tecnm.mx).

*** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Iguala, Carretera Iguala - Tuxpan km 2.5, Iguala de la Independencia, Guerrero, México.*

(email: noriega.david@hotmail.com)

**** Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero. Avenida Catalina Pastrana S/N, Col. C.I.V.I., C.P. 40030, Iguala de la Independencia, Guerrero, México. (email: andresdlc@utrng.edu.mx).*

Abstract: Deep learning is one of the most modern techniques for the creation of predictive models that support decision making with respect to the information provided and according to the field in which it is applied. Currently, deep learning models and new datasets are continuously proposed, which address the use of machine learning techniques. For this reason, this research presents the literature review of the most current works on the use of machine learning and deep learning for crop planting yield prediction, adopting Brereton's protocol, which consists of three phases: planning, execution and reporting, a number of innovative approaches to predict such yield have been explored. The analysis revealed very interesting strategies: the use of deep learning in conjunction with historical data, real sensor data and experimental data sets, the application of Machine Learning techniques as predictive models and a combination of both approaches.

P*alabras clave*: Revisión de la Literatura, Aprendizaje Profundo, Siembra de Cultivos, Predicción, Rendimiento.

1. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje profundo es una de las técnicas más modernas para la creación de modelos predictivos, sobre todo en situaciones en donde se utilizan grandes cantidades de datos para realizar una óptima predicción al respecto.

El desarrollo de la ciencia y la tecnología refresca constantemente la cognición humana, y el modelo de aprendizaje profundo se actualiza constantemente como modelo tecnológico central de la inteligencia artificial en el entorno de big data, reflejando los últimos avances en investigación de la ciencia y la tecnología actuales (Dong, 2021). Sin embargo, el aprendizaje profundo funciona mejor en un mundo estable con reglas precisas (Marcus, 2017). De esta manera, como un reto del aprendizaje profundo, se hace más evidente en el caso de dispositivos que monitorean cultivos, donde se requiere de sistemas que capturen muchos datos en tiempo real que realicen el almacenamiento en una base de datos de gran tamaño (datawarehouse) y por ende, el procesamiento de la información se torna muy complicado a la hora de tratar de implementar un método de predicción sobre todo si es información real novedosa y de ciclos de siembra como información histórica.

El objetivo de la presente investigación es presentar una revisión de la literatura de trabajos de investigación que utilicen aprendizaje automático y aprendizaje profundo para predecir el rendimiento que tendrá un productor en la siembra de maíz, soja y otras hortalizas. Sin embargo, también es el propósito de este artículo, ofrecer una alternativa como estrategia innovadora para obtener información más precisa y confiable acerca de este rubro.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se aborda el concepto de aprendizaje automático. La sección 3 muestra el método que se aplicó. La sección 4 expone los resultados del método aplicado. La sección 5 muestra la discusión sobre los trabajos analizados y finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones.

2. APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos del aprendizaje automático y aprendizaje profundo, respectivamente.

El aprendizaje automático es un campo que se ocupa del desarrollo y estudio de algoritmos que puedan encontrar automáticamente soluciones a problemas utilizando ejemplos de entrada o datos de entrenamiento (Pedro, 2012). Es un campo multidisciplinario que consiste en estadística, ciencias de la computación, álgebra lineal y optimización, por

ISSN: 2992-8338

mencionar algunos. La capacidad de aprender de los datos hace que los algoritmos de aprendizaje automático sean útiles principalmente para abordar problemas altamente no lineales, como la clasificación y la aproximación de funciones, donde es muy difícil o incluso imposible modelar la relación entre la entrada y la salida utilizando técnicas tradicionales (Ray, 2019); algunos ejemplos de este tipo de problemas son la clasificación de imágenes (González, 2007), la identificación de textos (Lecun et al., 1998), los juegos de Atari (Mnih et al., 2013) y la resolución de juegos de mesa (Silver et al., 2017). El proceso de aprendizaje a menudo se clasifica en aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado y aprendizaje por refuerzo Porawagamage G. (2024).

Por definición, el aprendizaje profundo es la aplicación de redes neuronales multineuronas y multicapa para realizar tareas de aprendizaje, como la regresión, la clasificación, la agrupación, la codificación automática y otras. Conceptualmente, la neurona computacional más básica, la neurona sigmoide, puede considerarse como un único nodo logístico (aunque hay muchos otros algoritmos que pueden implementarse como funciones de activación). Cada neurona está conectada a la entrada que está delante de ella, y se utiliza una función de pérdida para actualizar los pesos de la neurona y optimizar el ajuste logístico a los datos entrantes W. G. Hatcher (2018).

3. MÉTODO

Para llevar un enfoque estructurado en la revisión de estudios que exploran diversas estrategias para la obtención de datos precisos y confiables sobre aprendizaje automático aplicado a la predicción del rendimiento en la siembra de cultivos.

Se lleva a cabo el protocolo que se muestra en la Figura 1, basado en la propuesta de Brereton (Brereton et al., 2007). Este protocolo se divide en tres fases fundamentales: planear la revisión, ejecutar la revisión y reportar la revisión. En la fase de la planeación, se describe el problema de investigación y se formulan las preguntas de investigación. En la fase de ejecución, se seleccionan las fuentes de información y se seleccionan los estudios primarios siguiendo cadenas de búsqueda establecidas, además de establecer criterios claros de inclusión y exclusión.

Finalmente, en la fase de reporte, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de cada estudio primario seleccionado, abordando las preguntas de investigación planteadas en la fase de planificación. Este proceso metodológico garantiza una revisión sistemática y rigurosa de la literatura, proporcionando una base sólida para las conclusiones y recomendaciones.

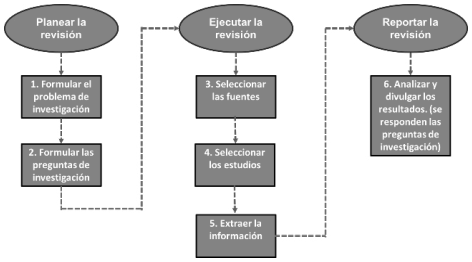


Figura 1. Proceso de la revisión de la literatura.

4. RESULTADOS

A continuación, se describen los hallazgos obtenidos en cada fase del método empleado para realizar el estudio de trabajos relacionados al contexto del uso de estrategias para la obtención de información acerca del aprendizaje automático aplicado a la predicción del rendimiento en la siembra de cultivos.

4.1 Planear la revisión

a) Formular el problema de la investigación

El desafío agrícola de predecir el rendimiento en la siembra de cultivos como el maíz, la soja y otras hortalizas en el campo mexicano, se enmarca en una compleja red de factores. Desde su vasta diversidad geográfica a lo largo y ancho del país hasta la necesidad de mantener un análisis confiable de la producción agrícola para la siembra de cultivos por los productores mexicanos, como también para recolectar y analizar datos, cada aspecto contribuye al elevado costo y la complejidad metodológica de esta tarea. Además de conocer si hay siembra siniestrada debido a algunos factores, como, por ejemplo: el cambio climático, las enfermedades y plagas que afectan a los cultivos, entre otros.

En este trabajo, se exploran algunos estudios que se adentran en estrategias específicas para abordar el complejo proceso de recolección y análisis de datos. Nuestro objetivo es brindar un apoyo sólido a la predicción del rendimiento en la siembra de cultivos, destacando cómo estas investigaciones pueden ofrecer soluciones innovadoras frente a un desafío tan crucial para el desarrollo agrícola en el país.

b) Formular las preguntas de investigación

Las preguntas planteadas en la investigación en base al problema descrito son las siguientes:

Q1. ¿Cuáles son los enfoques detectados en los trabajos seleccionados para la predicción del rendimiento en la siembra de cultivos?
Q2. ¿Cuáles son los atributos utilizados en los trabajos seleccionados para predecir el rendimiento en la siembra de cultivos?

4.2 Ejecutar la revisión

a) Selección de fuentes de información

Para realizar la búsqueda de trabajos relacionados a la pregunta de investigación, se seleccionaron 9 bases de datos científicas las cuales son: Science research publishing (Scirp), Scientific reports, Elsevier, Frontiers in plant science, MDPI y Wiley Hindawi, Springer nature singapore, Spanish journal of agricultural research (SJAR) y Association for the advancement of artificial intelligence (AAAI). Se utilizan 2 cadenas de búsqueda las cuales se describen a continuación:

A. Machine Learning and Crop Planting Yield Prediction
B. Deep Learning and Crop Planting Yield Prediction

ISSN: 2992-8338

b) Seleccionar los estudios

Como se observa, en este trabajo se recolecta un total de 13 artículos a partir del análisis de su título. De los 13 trabajos seleccionados, se analiza el título, resumen y palabras clave para filtrar 10 artículos candidatos. Posteriormente, de los 10 artículos candidatos se analiza su título, resumen, introducción y las conclusiones para obtener como resultado 8 artículos, que tratan de responder a las preguntas de investigación Q1 y Q2 planteadas en la sección 4.1.

Los criterios de inclusión y exclusión utilizados fueron los que se describen a continuación:

Inclusión

- Se seleccionan sólo artículos que fueron publicados en el periodo 2014-2023.
- Se seleccionan artículos que tratan el contexto de relevancia sobre el aprendizaje automático aplicado a la predicción del rendimiento en la siembra de cultivos.

Exclusión

- Los artículos en idiomas diferentes al inglés.
- Tesis
- Informes para propósitos de titulación.
- Libros
- Páginas Web.

c) Extraer la información

Debido a que solo fueron 13 trabajos los que se analizaron, no se requirió de alguna herramienta o formato para extraer la información, únicamente se llevó a cabo, tal como se explicó en el punto 4.2. incisos a y b.

4.3 Reportar la revisión

a) Analizar y divulgar los resultados

En esta sección se describen los resultados de los estudios primarios seleccionados. En la Figura 2, se muestran los 13 estudios primarios seleccionados agrupados por base de datos donde fueron encontrados. Como se observa, se tomaron 2 estudio de la base de datos Scirp, 4 de la base de datos Scientific reports, 1 de la base de datos Elsevier, 1 de la base de datos Frontiers in plant science, 1 de la base de datos MDPI, 1 de la base de datos Wiley Hindawi, 1 de la base de datos de Springer nature singapore, 1 de la base de datos de Spanish journal of agricultural research (SJAR) y 1 de la base de datos de Association for the advancement of artificial intelligence (AAAI).

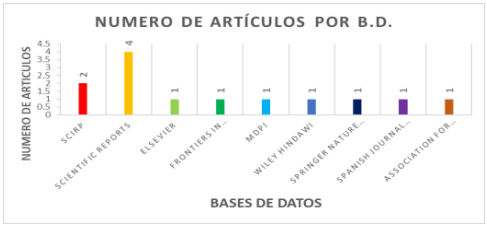


Figura 2. Clasificación de artículos primarios agrupados por bases de datos.



Figura 3. Artículos primarios agrupados por año de publicación.

De los 13 estudios seleccionados, se analizan 8 y se detectan 2 enfoques que responden a la pregunta de investigación Q1 la cual se describe en la sección 4.1. Cada uno de estos enfoques se selecciona con base en el análisis de cada uno de estos trabajos.

Se detecta que hay un gran número de investigaciones que se inclinan por dar solución al problema sobre la obtención de datos confiables y precisos para predecir el rendimiento en la siembra de cultivos. Sin embargo, en México hay incipientes estudios sobre las predicciones del rendimiento en la siembra de cultivos a través de aprendizaje automático y a partir de esto, se busca la implementación de un modelo predictivo, el cual corresponde con el Enfoque A. También se detecta el uso de aprendizaje profundo como modelos predictivos y, por lo tanto, surgen nuevas investigaciones clasificándose en el segundo enfoque identificado en este artículo como el Enfoque B.

En la Figura 4, se muestra el porcentaje de trabajos seleccionados.



Figura 4. Distribución de estudios agrupados por enfoque.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada artículo agrupado por enfoque.

Enfoque A: Aprendizaje automático y rendimiento en la siembra de cultivos.

El problema que abordan los trabajos clasificados en este enfoque consiste en la dificultad para obtener información precisa sobre el rendimiento en la siembra de cultivos. La falta de datos precisos en estas áreas representa un obstáculo importante para la implementación efectiva de medidas destinadas a mejorar el rendimiento en la siembra de cultivos.

En la propuesta de investigación de Gupta (2022), primero, se recopiló un conjunto de datos de entrada que contenían todos

ISSN: 2992-8338

los detalles relacionados con el cultivo, las características se seleccionaron usando el algoritmo de relieve. En esta propuesta la selección de funciones permitió lograr resultados precisos al clasificar atributos importantes relacionados con un problema particular del mundo real, las características se extrajeron utilizando un algoritmo de análisis discriminante lineal. En esta propuesta para la clasificación se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático, como máquina de vectores de soporte de optimización de enjambre de partículas, K vecinos más cercanos y bosque aleatorio.

En la propuesta de investigación de Bhullar (2023), **s**e utilizó un perceptrón multicapa para modelizar el rendimiento de los cultivos de cebada, colza, linaza, lentejas, avena, guisantes, soja, maíz y trigo de primavera en todo Canadá. Como resultado de esa propuesta, la salida fue una respuesta multivariante continua, y la entrada fueron las variables suelo-clima-paisaje, es decir, no se trató de un modelo espacio temporal, ya que no tuvo en cuenta la estructura de varianza-covarianza a escala espacial o temporal.

Derivado de esta propuesta, el perceptrón tuvo 16 neuronas de entrada, 3 capas ocultas con 256, 512 y 256 neuronas, respectivamente, y una capa de salida con 9 neuronas (una para cada cultivo). La red también contuvo un dropout del 95% para cada capa oculta y utilizó la función no lineal ReLU. Una red pequeña con un dropout alto ayudó a evitar el sobreajuste, ya que el conjunto de entrenamiento fue pequeño.

El perceptrón multicapa se entrenó de forma que, para un distrito determinado durante un año, predijera cuánto volumen de cultivo se produjo en cada píxel de resolución espacial del distrito en el que se observó que crecía el cultivo. Entonces utilizando como entrada las 16 variables suelo-clima-paisaje en cada píxel; un solo píxel representó un área de 0,3 km por 0,5 km.

En la propuesta de investigación de Chana (2023), se necesitaron datos históricos que se utilizaron para el entrenamiento y prueba del modelo. También se necesitaron datos en tiempo real utilizados para validar y predecir el cultivo adecuado según el modelo entrenado. Los datos históricos de nitrógeno, potasio, fósforo, pH, temperatura y humedad correspondientes a cultivos específicos se obtuvieron de un conjunto de datos ya existente.

En esta propuesta, el conjunto de datos tuvo 2,200 registros para cuatro tipos de cultivos. Así como también se utilizó el pronóstico a corto plazo, ya que se necesitaba un período de 7 días o más para obtener los valores de pronóstico de precipitación, temperatura, humedad y viento, que funciona con soluciones de aprendizaje automático convolucional. En esta propuesta se utilizó el algoritmo random forest para examinar el crecimiento de los cultivos en relación con los parámetros actuales del suelo: pH, N, P, K, T y H. Entonces hubo dos procesos: primero, la predicción de la cosecha utilizando el conjunto de datos entrenado y, segundo, la recomendación utilizando el pronóstico del tiempo y el sistema experto.

En la propuesta de investigación de Kofi Nti (2023), el conjunto de datos se obtuvo de Kaggle, el cual incluye datos sobre las cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo, así como mediciones de temperatura, humedad, pH y precipitaciones, y cómo éstos afectaron al crecimiento de los cultivos.

En dicha propuesta, el tamaño de los datos fue de 2,200 registros y siete predictores. Tras eliminar estos valores atípicos, quedaron 2,195 puntos de datos limpios. A continuación, se aplicó la normalización Min-Max para escalar los datos limpios, preservando la distribución original y garantizando que todas las características estuvieran en la misma escala. Entonces, hecho lo anterior, los datos limpios se dividieron en un 80% de entrenamiento y un 20% de prueba.

En esta propuesta se utilizó el apilamiento, la cual es una técnica de aprendizaje por conjuntos basado en árboles, que consiste en entrenar varios modelos de aprendizaje automático individuales y luego combinar sus resultados en un metamodelo para las predicciones finales. La principal ventaja del apilamiento es que puede mejorar la precisión y solidez del modelo final. Al combinar los puntos fuertes de los distintos modelos como técnicas de aprendizaje por conjuntos basado en árboles individuales, el metamodelo puede aprender a identificar patrones en los datos que podrían no ser evidentes para ningún modelo por sí solo.

Enfoque B: Aprendizaje profundo y rendimiento en la siembra de cultivos.

El problema que abordan los trabajos clasificados en este enfoque es el mismo que aborda el enfoque A. Sin embargo, los métodos de predicción son diferentes. Para solucionarlo, se plantea el uso de técnicas de Deep Learning en combinación con datos de diferentes fuentes como bases de datos de carácter particular como syngenta y otras de carácter público como kaggle, así como de conjuntos de datos experimentales para solventar dicha problemática.

En la propuesta de investigación de Khaki (2019), se utilizan datos del mundo real para predecir el desempeño de los híbridos de maíz en 2017 en diferentes lugares, basándose en el Desafío de Cultivos Syngenta 2018, en el cual se pidió a los participantes hacer uso de dichos datos. En esta propuesta se utilizó un conjunto de datos el cual incluye 2,267 híbridos experimentales plantados en 2,247 ubicaciones entre 2008 y 2016 en los Estados Unidos y Canadá.

La propuesta utiliza una red neuronal para uno de los conjuntos de datos más grandes y completos que estuvieron disponibles públicamente obteniendo resultados para la investigación en predicción de rendimiento, lo que permitió el despliegue y la validación del modelo de red neuronal profunda propuesto. También se realizó una selección de características basada en el modelo de red neuronal profunda entrenado, que disminuyó con éxito la dimensión del espacio de entrada sin una caída significativa en la precisión de la predicción.

ISSN: 2992-8338

En la propuesta de investigación de Kim (2020), se emplearon seis modelos principales de inteligencia artificial para modelar el rendimiento de los cultivos. En esta propuesta se utiliza un conjunto de datos de entrenamiento, el cual estuvo agrupado por splines adaptativos que tuvieron diferentes pendientes, pero además que estuvieran conectados suavemente mediante una función polinómica. La propuesta utiliza un bosque aleatorio el cual construyó a la vez muchos árboles de decisión con características ligeramente diferentes extrayendo muestras aleatorias de los datos de entrenamiento, dando como resultado el establecer el número de árboles en 500 para el proceso de poda.

La tolerancia del entrenamiento fue un tamaño de error para la convergencia del entrenamiento del modelo; la tasa de aprendizaje fue un incremento/disminución del peso durante una iteración. Se configuraron tres nodos en una capa oculta mediante las pruebas de rendimiento. Se realizaron 10 rondas de pruebas ciegas de un año de ausencia dividiendo el conjunto de datos en un grupo de entrenamiento de nueve años y un grupo de validación de un año de toda la base de datos de emparejamiento (2006-2015).

La propuesta de investigación de Khalilzadeh (2022), se llevó a cabo en tres fases, como son: datos, preprocesamiento de datos, la predicción de las unidades de grado crecientes y el modelo de optimización.

En la fase de datos, se utilizó un conjunto de datos el cual contiene información de dos grupos separados de híbridos de maíz, incluidas 1,375 y 1,194 poblaciones diferentes de semillas de maíz, plantadas en dos sitios numerados como el sitio 0 y el sitio 1, respectivamente. Se proporcionaron las fechas de siembra más tempranas y más tardías (ventanas de siembra) correspondientes a cada población de semillas para garantizar que cada híbrido se plantó dentro de su ventana de siembra.

Por otro lado, en la fase de preprocesamiento de datos, para equilibrar la complejidad y la precisión, se decidió modelar la línea de tiempo del crecimiento de los cultivos semanalmente. Como resultado, se convirtieron las fechas de siembra temprana y tardía a sus números de semana correspondientes usando la función weeknum de microsoft excel, donde la semana 1 comenzó el 1 de enero y todas las semanas posteriores comienzan los domingos.

Una vez que se llegó a la fase de modelos de optimización, en ésta se propusieron cuatro modelos de optimización para programar fechas de siembra y cosecha de poblaciones de semillas. Los dos primeros modelos se aplicaron para el caso 1, en el cual, las capacidades de almacenamiento para los sitios 0 y 1 fueron consideradas de 7,000 y de 6,000 mazorcas, respectivamente.

En esta propuesta de investigación Rani (2023), el modelo propuesto se dividió en dos etapas, es decir, la fase 1 se implementó para la predicción del clima, mientras que la fase 2 se usó para identificar el cultivo óptimo. La fase 1 se implementó utilizando una red neuronal recurrente y en la fase 2, el clasificador de bosque aleatorio se usó para la selección de cultivos utilizando parámetros climáticos y de suelo pronosticados de la región.

Se utilizó el modelo como retroalimentación de memoria a corto plazo de red neuronal recurrente, debido a la dependencia climática de condiciones anteriores. Derivado de la propuesta para una selección adecuada de cultivos, en este trabajo se consideraron múltiples parámetros climáticos y de suelo, lo que requirió considerar la combinación de múltiples árboles de decisión y, en tales casos, el clasificador de bosque aleatorio pudo desempeñar un papel importante en el dominio del problema.

5. DISCUSIÓN

La revisión de la literatura revela que el empleo de tecnologías como el Machine Learning y Deep Learning ofrece una alternativa para predecir el mejor rendimiento en la siembra de cultivos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales. Esta revisión describe una metodología para la búsqueda de trabajos relacionados con el contexto aplicado a la predicción del rendimiento en la siembra de cultivos, y como resultado de esta búsqueda sistemática se concluye lo siguiente:

En respuesta a la pregunta de investigación Q1, se recopilaron un total de 13 estudios, de los cuales 2 se encontraron en Scirp, 4 en Scientific reports, 1 en Elsevier, 1 en Frontiers in plant science, 1 en MDPI, 1 en Wiley Hindawi, 1 en Springer nature singapore, 1 en Spanish journal of agricultural research (SJAR) y 1 en Association for the advancement of artificial intelligence (AAAI).

Se identificaron 2 enfoques importantes: Machine Learning como modelos predictivos y Deep Learning con algunas de sus técnicas más utilizadas.

Para responder a la pregunta de investigación Q2, se detectaron varios atributos entre ellos variables del suelo como: nitrógeno, fósforo, potasio y pH, así mismo algunas variables climáticas como: temperatura, humedad y precipitación. Estas características fueron consideradas las más importantes. Se concluye que el uso de tecnologías como el Machine Learning y Deep Learning ofrece una alternativa prometedora para predecir el mejor rendimiento en la siembra de cultivos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales que los productores aplican casi de forma empírica.

6. CONCLUSIONES

En este estudio y análisis de la literatura, además de lo explicado en el apartado de discusión, fue posible identificar que los trabajos que tuvieron una mejor precisión para determinar el rendimiento de la siembra de cultivos, fueron aquellos que utilizaron datos del clima, sequías, olas de calor, ubicación, temporada, con algoritmos de aprendizaje automático, aprendizaje profundo y aprendizaje semi supervisado como redes neuronales recurrentes, método de

ISSN: 2992-8338

retropropagación, redes neuronales profundas, algoritmo de relieve, máquina de vectores de soporte de optimización de enjambre de partículas, K vecinos más cercanos y bosque aleatorio, red neuronal recurrente con retroalimentación de memoria a corto plazo, naïve bayes, clasificador de bosque aleatorio. Los enfoques que presentaron una precisión menor fueron aquellos que utilizaron datos experimentales, imágenes satelitales discretizadas, datos de inventarios anuales de cultivos, índices de vegetación y algoritmos de perceptrón multicapa, validación cruzada con K-fold.

Esto abre un campo de oportunidad para nuevas investigaciones que exploren una mayor cantidad de datos de factores ambientales, nutrientes del suelo y tipos de cultivos resistentes al cambio climático, para intentar no solo predecir el rendimiento en la siembra de los cultivos, sino también la predicción de las fechas estimadas para la siembra de cultivos de temporal en el periodo primavera-verano.

7. REFERENCIAS

Bhullar, A., Nadeem, K., & Ali, R. (2023). “Simultaneous multi-crop land suitability prediction from remote sensing data using semi-supervised learning”. *Sci Rep.*, 6823. https://doi.org/10.1038/s41598-023-33840-6.

Chana, A. M., Batchakui, B., & Nges, B. (2023). “Real-Time Crop Prediction Based on Soil Fertility and Weather Forecast Using IoT and a Machine Learning Algorithm”. *Agricultural Sciences, 14*, 645-664. https://doi.org/10.4236/as.2023.145044.

Dong, S., Wang, P., & Khushnood, A. (2021). “A survey on deep learning and its applications”. *Computer Science Review, 40*, 100379. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100379.

Gupta, S., Khan, R., Geetha, A., Sankaran, K., Sakthidasan, Z., Abu, S., . . . Mohammed Hussien, S. (2022). “Machine Learning and Feature Selection Enabled Framework for Accurate Crop Yield Prediction”. *Journal of Food Quality, 2022*, 7. https://doi.org/10.1155/2022/6293985.

Khaki, S., & Wang, L. (2019). “Crop Yield Prediction Using Deep Neural Networks”. *Front. Plant Sci., 10*(621). https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00621.

Khalilzadeh, Z., & Wang, L. (2022). “Corn planting and harvest scheduling under storage capacity and growing degree units uncertainty”. *Sci Rep.*, 12. https://doi.org/10.1038/s41598-022-25797-9.

Kim N., N. S.-I., Park, C.-W., Huh, M., Oh, J., Ha, K.-J., Cho, J., & Lee, Y.-W. (2020). “An Artificial Intelligence Approach to Prediction of Corn Yields under Extreme Weather Conditions Using Satellite and Meteorological Data”. *Applied Sciences, 10*(11). https://doi.org/10.3390/app10113785.

Kofi Nti, I., Zaman, A., Nyarko-Boateng, O., Felix Adekoya, A., & Frimpong, K. (2023). “A predictive analytics model for crop suitability and productivity with tree-based ensemble learning”. *Decision Analytics Journal, 8*, 100311. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100311.

Rani, S., Mishra, A. K., & Kataria A. et al. (2023). “Machine learning-based optimal crop selection system in smart agriculture”. *Sci Rep., 13*, 15997. https://doi.org/10.1038/s41598-023-42356-y.

W. G. Hatcher y W. Yu, (2018). "A Survey of Deep Learning: Platforms, Applications and Emerging Research Trends", en IEEE Access, vol. 6, pp. 24411-24432. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2830661.

Porawagamage G, Dharmapala K, Chaves JS, Villegas D and Rajapakse A. (2024). “A review of machine learning applications in power system protection and emergency control: opportunities, challenges, and future directions”. Front. Smart Grids 3:1371153. https://doi.org/10.3389/frsgr.2024.1371153.

Pedro, D. A. (2012). “Few useful things to know about machine learning”. Commun. ACM 55, 79–88. https://doi.org/10.1145/2347736.2347755.

Ray, S. A. (2019). “Quick review of machine learning algorithms,” in Proceedings of the International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing: Trends, Perspectives and Prospects, COMITCon, 35–39.

Gonzalez, T. F. (2007). “Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics”. London: Chapman and Hall/CRC.

LeCun, Y. (2015). LeNet-5, convolutional neural networks. URL: http://yann. lecun. com/exdb/lenet, 20(5), 14.

Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, I., Wierstra, D., & Riedmiller, M. (2013). “Playing atari with deep reinforcement learning”. arXiv preprint arXiv:1312.5602.

Silver, D., Hubert, T., Schrittwieser, J., Antonoglou, I., Lai, M., Guez, A., ... & Hassabis, D. (2017). “Mastering chess and shogi by self-play with a general reinforcement learning algorithm”. arXiv preprint arXiv:1712.01815.

Marcus, G. (2017). “Deep Learning: A Critical Appraisal”. Obtenido de https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1801/1801.00631.pdf?_ga=2.16425328.716335717.1538984073-299343837.1518693160.

Brereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D., Turner, M., & Khalil, M. (2007). Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, *80*(4), 571–583. https://doi.org/10.1016/J.JSS.2006.07.009.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Revisión de convertidores CD-CD de tres puertos aislados para sistemas fotovoltaicos con almacenamiento integrado

Leonardo Guerrero Uribe*Dr. Mario Ponce SilvaDr. Abraham Claudio Sanchez*****

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, (CENIDET) (e-mail: m23ce103@cenidet.tecnm.mx).

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, (CENIDET) (e-mail: mario.ps@cenidet.tecnm.mx)

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, (CENIDET) (e-mail: abraham.cs@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: The synergy between photovoltaic technology and energy storage systems is emerging as a promising and cost-effective approach to addressing renewable energy challenges in residential settings. The traditional method of photovoltaic and energy storage system interconnection requires the implementation of two or even three independent power electronic converters, leading to a higher number of conversion stages for certain power flows, and consequently, may degrade the quality of energy. In contrast, three-port DC-DC converters present an efficient alternative aimed at reducing the number of conversion stages and the quantity of independent converters required. These converters can be classified into three groups based on their isolation characteristics between ports. This analysis focuses on fully isolated three-port DC-DC converters, with special emphasis on topological variants using resonant tanks. A comprehensive framework is provided regarding the benefits and limitations of these devices, with the aim of meeting the requirements of photovoltaic and energy storage systems.

Keywords: FV, SAE, CTP, TAB, Resonante.

1. INTRODUCCIÓN

La energía fotovoltaica (FV) se ha consolidado como una de las principales fuentes de energía renovable en el panorama energético global (Li & Wolfs, 2008). En el camino hacia el desarrollo de energía sostenible y libre de emisiones, la integración efectiva de más sistemas de energías renovables y SAE (Sistemas de Almacenamiento de Energía), desempeña un papel crucial (Truong et al., 2017). Según el informe del Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica (PVPS, por sus siglas en inglés) de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), la capacidad total instalada de sistemas fotovoltaicos solares a nivel mundial alcanzó los 1160 GW en 2022, con una tasa de instalación anual de 220 GW (Europe, 2022). Es notable que una parte significativa de estas instalaciones se encuentra en forma de sistemas fotovoltaicos en tejados de viviendas residenciales.

En países como Australia, las instalaciones FV, principalmente residenciales, han experimentado un crecimiento constante, complementado con un aumento en sistemas comerciales en tejados. A nivel mundial, la capacidad total de los SAE en aplicaciones estacionarias se estima en 11 GWh, con proyecciones que sugieren un aumento sustancial a entre 100 GWh y 167 GWh para el año 2030 (Md Mejbaul Haque et al., 2023). Estos sistemas SAE, en su mayoría residenciales, representan una oportunidad crucial para optimizar la penetración de las energías renovables en la red eléctrica, especialmente a medida que los costos de los SAE basados en iones de litio continúan disminuyendo gradualmente (Md Mejbaul Haque et al., 2023). Se prevé que esta tendencia hacia una mayor penetración de los SAE en el sector energético se mantenga y se refuerce hacia el año 2030 (Md Mejbaul Haque et al., 2023).

La integración de SAE con sistemas FV presenta una serie de desafíos, especialmente en términos de eficiencia y costos de los convertidores de energía. La necesidad de múltiples etapas de conversión y la complejidad asociada con la gestión del flujo de potencia plantean interrogantes sobre la viabilidad económica y técnica de esta integración (Bhattacharjee, Kutkut, & Batarseh, 2018). Sin embargo, la evolución de los convertidores de energía hacia topologías de múltiples puertos ofrece nuevas perspectivas. Estos convertidores permiten flujos de energía más flexibles entre diferentes fuentes de energía y dispositivos de almacenamiento, al tiempo que prometen una mayor eficiencia y densidad de potencia (Zhang, Sutanto, & Muttaqi, 2016).

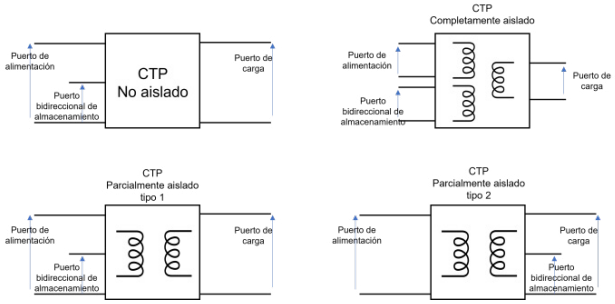


Figura 1 CTP categorizados de acuerdo al aislamiento galvánico.

Dependiendo de las necesidades específicas de aislamiento galvánico, los convertidores de tres puertos (CTP) pueden ser categorizados en tres variantes: topologías no aisladas, topologías completamente aisladas y topologías parcialmente aisladas como se muestra en Figura 1. Mientras que los CTP sin aislamiento ofrecen la ventaja de ser compactos y económicos, su utilidad está limitada a aplicaciones donde el aislamiento galvánico no es crítico. En contraste los CTP parcialmente aislados cumplen con el requisito mínimo de aislamiento galvánico entre un puerto

ISSN: 2992-8338

y los otros dos con tierra común. En estos casos, los puertos que comparten tierra son la batería y el panel fotovoltaico, para permitir la conexión a un bus de CD con la opción de interconectarse a la red eléctrica.

Este trabajo abordará el estudio de las topologías completamente aisladas que suelen emplear transformadores de múltiples bobinados o múltiples transformadores de dos bobinados para lograr el aislamiento galvánico entre todos los pares de puertos, facilitando así la igualación de voltajes, el manejo de altas potencias y la posibilidad de implementar topologías resonantes que mejoren la eficiencia (Zhang et al., 2016), (Wang et al., 2020), (Md Mejbaul Haque et al., 2023).

En este contexto, surge la necesidad de una revisión exhaustiva de las topologías de los CTP completamente aislados para sistemas fotovoltaicos con almacenamiento. La organización de esta revisión es la siguiente: en la sección 2 se abordan las topologías y los modos de operación de los CTP. En la sección 3 se presenta la revisión topológica de los CTP. Finalmente, en la sección 4 se presenta una reflexión sobre las ventajas y limitaciones de estas topologías de convertidores.

2. TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES DE TRES PUERTOS

Los CTP representan una clase de convertidores de energía que ofrecen una solución eficiente y versátil para la integración de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de energía. En esta sección, se explorará en detalle la topología de los CTP y su aplicación en sistemas FV-SAE, tomando como referencia las investigaciones reportadas en la literatura.

La topología básica de un CTP se muestra en la Figura 1 y consta de tres puertos principales, cada uno con funciones específicas en el sistema (Arulmozhi & Santha, 2020). Un puerto se conecta al conjunto FV, un segundo puerto se conecta a la carga, y un último puerto se conecta a la batería de almacenamiento de energía (Wang et al., 2020). Estos puertos pueden ser bidireccionales, lo que permite la transferencia de energía en ambas direcciones según las necesidades del sistema.

Las topologías CTP tienen distintos flujos de potencia, en (Md Mejbaul Haque et al., 2023) se representan 6 modos de operación ilustrados en la Figura 2. En el modo 1, el conjunto fotovoltaico satisface la demanda de carga y el excedente de generación fotovoltaica se almacena en el SAE. En el modo 2, el SAE absorbe toda la potencia fotovoltaica cuando la demanda de potencia de carga cae a cero. En el modo 3, el conjunto fotovoltaico y el sistema SAE suministran la demanda de potencia de carga. Si la potencia de carga del sistema SAE cae a cero, el conjunto fotovoltaico suministra energía para satisfacer la demanda de carga en el modo 4. El modo 5 permite que el sistema SAE satisfaga la demanda de potencia de carga y/o se cargue utilizando la energía de la red cuando la generación fotovoltaica no está disponible. El modo 6 permite que el sistema SAE se cargue desde la red mientras el conjunto fotovoltaico suministra energía a la carga. Los modos operativos 5 y 6 requieren que la topología del convertidor CTP tenga un puerto de salida de CA capaz de garantizar una operación de CA de cuatro cuadrantes completa para facilitar el flujo de potencia de CA bidireccional entre la red y la batería. La revisión está dominada por el CTP con tres puertos CD. Un puerto de CA es extremadamente raro. Un puerto CD bidireccional puede suministrar un inversor no aislado para formar un puerto de CA de cuatro cuadrantes efectivo. (Md Mejbaul Haque et al., 2023).

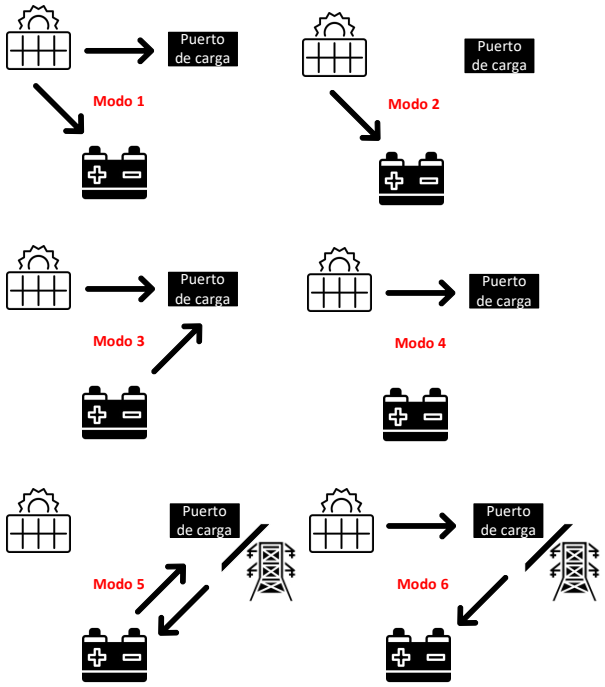


Figura 2 Modos de operación de los CTP.

Según (Wang et al., 2020), se establece que los CTP requieren de al menos tres rutas de transmisión de energía que son mostradas en la Figura 3. Desde el puerto FV al puerto de carga, P2L por sus siglas en inglés (PV port to Load port branch), desde puerto FV a puerto SAE, P2B por sus siglas en inglés (PV port to Battery port branch) y finalmente desde el puerto SAE al puerto de carga, B2L por sus siglas en inglés (Battery port to Load port branch). Estos tres caminos resultan en 5 posibles estructuras.

ISSN: 2992-8338

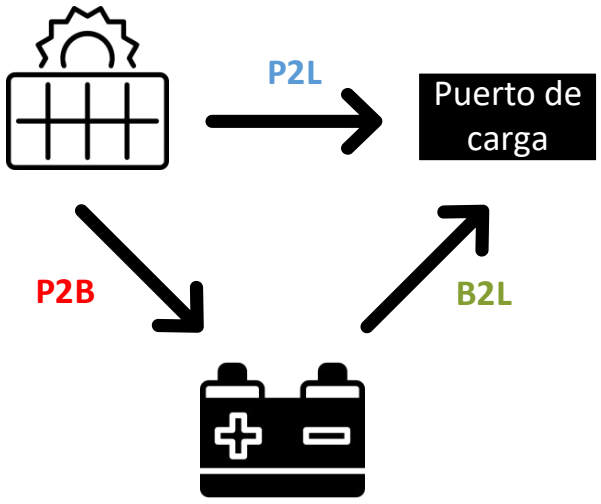


Figura 3 Rutas de transmisión de energía de los CTP.

Para el propósito principal de transmitir energía desde el puerto de generación fotovoltaica al puerto de consumo de carga, se identifican dos rutas factibles de transmisión de energía. La Ruta I, directa, transmite energía exclusivamente a través de la rama P2L, mientras que la Ruta II, indirecta, transmite energía mediante las ramas P2B y B2L. En general, se ha observado que la potencia promedio transmitida por la Ruta I supera significativamente a la de la Ruta II. Por consiguiente, se denominan Ruta principal de transmisión de energía y Ruta secundaria de transmisión de energía, respectivamente. Dado que cada rama de transmisión de energía puede operar mediante un convertidor CD/CD de dos puertos unidireccional, con al menos una variable de control independiente, como el ciclo de trabajo, la frecuencia, la fase, etc., se satisface plenamente el requisito de control para los CTP. Posteriormente, se deriva la topología correspondiente. Se observa que la transmisión de energía a través de la Ruta principal requiere una conversión de potencia de una sola etapa, mientras que la de la Ruta secundaria necesita una conversión de potencia de dos etapas. En consecuencia, la topología es designada como estructura primaria de una etapa y secundaria de dos etapas, P1S2 por sus siglas en inglés (Primary single stage and secondary two stage) (Wang et al., 2020).

En el caso anterior la energía transmitida inicialmente por la ruta principal de transmisión de energía también puede fluir a través de la ruta secundaria de transmisión de energía, a diferencia de la estructura primaria de 2 etapas y secundaria de dos etapas, P2S2 por sus siglas en inglés (Primary two stage and secondary two stage) que comparte una sola ruta para los flujos de potencia, eliminando el camino P2L. De manera análoga, tanto la rama P2B como la rama B2L pueden ser implementadas mediante un convertidor CD/CD de dos puertos unidireccional, cumpliendo así con el requisito de control.

Para llevar a cabo la carga y descarga de la batería se puede emplear un convertidor CD/CD bidireccional de dos puertos, considerando que la potencia de carga y descarga son iguales sin considerar las pérdidas. Este convertidor interactuará con la batería. Al tener tanto las ramas de transmisión de potencia de carga como de descarga con una variable de control independiente, solo se requiere otro convertidor CD/CD de dos puertos unidireccional para proporcionar la tercera rama de transmisión de potencia y otra variable de control independiente para los CTP. Por consiguiente, se obtienen dos diagramas de transmisión de potencia respectivamente. Las topologías correspondientes están constituidas de la siguiente manera: la potencia transmitida a través de la ruta de transmisión de potencia primaria requiere una conversión de potencia de una sola etapa, mientras que la potencia transmitida a través de la ruta de transmisión de potencia secundaria requiere una conversión de potencia de tres etapas. La explicación radica en que, durante el proceso de carga de la batería, se lleva a cabo una conversión de potencia de una sola etapa, mientras que, durante el proceso de descarga, se requiere una conversión de potencia de dos etapas. Por otro lado, una variante de esta estructura sería que durante el proceso de carga de la batería, se lleva a cabo una conversión de potencia de dos etapas, mientras que durante el proceso de descarga, se requiere una conversión de potencia de una sola etapa (Wang et al., 2020).

Como resultado, las topologías anteriormente descritas se designan como 'Estructura primaria de una etapa y secundaria de tres etapas tipo-I (P1S3-I)' y 'Estructura primaria de una etapa y secundaria de tres etapas tipo-II (P1S3-II)' respectivamente. Por último, para facilitar la interconexión de tres buses de CD que se conectan con tres subsistemas de CD respectivamente, se puede emplear la topología denominada 'Estructura primaria de dos etapas y secundaria de cuatro etapas (P2S4)'. En comparación con la arquitectura convencional basada en buses de CD, esta estructura ofrece una mayor densidad de potencia sin requerir capacitores de enlace de CD voluminosos. Los tres convertidores CD/CD intercambian energía a través de un bus dinámico común, y son identificados como convertidor de puerto PV a bus (P2BUS), convertidor de bus a puerto de carga (BUS2L) y convertidor de batería a bus (B2BUS) respectivamente (Wang et al., 2020).

En referencia al trabajo (Wang et al., 2020), se realiza un análisis comparativo exhaustivo de las cinco topologías de los CTP (P1S2, P2S2, P1S3-I, P1S3-II y P2S4). Este análisis abarca tres dimensiones fundamentales: la eficiencia de sistema, la complejidad topológica, y la implementación del control.

Eficiencia del sistema: La eficiencia del sistema en los CTP se define como la relación entre la potencia promedio del puerto de salida al puerto PV en una base diaria. Esta eficiencia se ve influenciada por varios factores, como la topología, la potencia nominal y la frecuencia de conmutación. En general, menos etapas de conversión de potencia conducen a una mayor eficiencia del sistema. La estructura 'P1S2' muestra la eficiencia más alta, seguida de las estructuras 'P1S3-I' y 'P1S3-II'. La eficiencia de la estructura 'P2S2' es menor, mientras que la estructura 'P2S4' tiene la eficiencia más baja (Wang et al., 2020).

ISSN: 2992-8338

Complejidad topológica: La complejidad topológica de los CPT se puede deducir a partir del número de convertidores CD/CD requeridos. La estructura 'P2S2' consta de dos convertidores de dos puertos unidireccionales, mientras que la estructura 'P1S3' incluye un convertidor CD/CD de dos puertos unidireccional y uno bidireccional. Por otro lado, la estructura 'P1S2' presenta tres convertidores CD/CD de dos puertos unidireccionales, y la estructura 'P2S4' está compuesta por dos convertidores CD/CD de dos puertos unidireccionales y uno bidireccional. En consecuencia, la estructura 'P2S2' se considera la más simple, seguida de la estructura 'P1S3', mientras que la estructura 'P1S2' resulta más compleja que estas dos y la estructura 'P2S4' es la más compleja de todas. Además, para lograr el aislamiento parcial de los CTP, especialmente el aislamiento de carga, se requieren dos convertidores CD/CD de dos puertos aislados (P2L y B2L) para la estructura 'P1S2', mientras que las estructuras 'P2S2', 'P1S3-I' y 'P2S4' solo necesitan un convertidor aislado. Sin embargo, esta función no es posible con la estructura 'P1S3-II' (Wang et al., 2020).

Realización del control: El control del sistema en los CTP se ve afectado por el número de controladores y la frecuencia de conmutación, lo que influye en la complejidad del control. La estructura 'P1S2' y 'P2S4' requieren más controladores, aumentando su complejidad. Por ejemplo, en la estructura 'P1S3-II', se necesitan múltiples conmutaciones de controlador para diferentes modos de operación, mientras que en 'P2S2' el control es más simple, ya que solo el controlador P2L necesita ser conmutado. Basándose en este análisis, se resume que la estructura 'P2S2' es preferible por su simplicidad topológica, la 'P1S2' por su alta eficiencia, y la 'P1S3-I' por su rendimiento general superior. Sin embargo, la 'P1S3-II' no es adecuada debido a su complejidad. Respecto a la 'P2S4', su rendimiento general no es satisfactorio, por lo que no se considera más en el estudio (Wang et al., 2020).

La evaluación de los convertidores de tres puertos destaca la importancia de considerar múltiples aspectos al seleccionar la estructura adecuada. Si bien cada una tiene sus virtudes y limitaciones, es fundamental encontrar un equilibrio entre eficiencia, complejidad y facilidad de control para optimizar el rendimiento del sistema. La estructura 'P1S2' sobresale por su alta eficiencia, aunque con una complejidad considerable, mientras que 'P2S2' ofrece simplicidad en el control a costa de una eficiencia ligeramente inferior. 'P1S3-I' presenta un rendimiento general superior, aunque con una complejidad significativa, y 'P1S3-II' se ve limitada por su complejidad a pesar de una eficiencia aceptable. En contraste, 'P2S4' se descarta debido a su rendimiento general insatisfactorio. En última instancia, la elección de la estructura ideal dependerá de las necesidades específicas del sistema y los compromisos entre eficiencia, complejidad y control.

3. REVISIÓN DE CONVERTIDORES AISLADOS DE TRES PUERTOS

Los CTP aislados unos de otros son ampliamente utilizados en sistemas de energías renovables interconectados a red, gracias al aislamiento galvánico proporcionado por lo que suele ser un transformador de alta frecuencia con múltiples devanados. En la literatura han sido propuestas varias topologías CTP completamente aisladas (Tao, Kotsopoulos, Duarte, & Hendrix, 2008),(Zhu, Zhang, Athab, Wu, & Gu, 2014),(M Mejbaul Haque, Wolfs, & Alahakoon, 2017),(Wu et al., 2020),(Chang, Yan, & Huang, 2023). Algunas de estas referencias presentan convertidores bidireccionales derivados de la topología de puente activo doble, DAB por sus siglas en inglés (Double Active Bridge), incluyendo un tercer devanado acompañado de un puente activo.

Las topologías derivadas del DAB en adición a un tercer puente activo completo se le denomina TAB, por sus siglas en inglés (Triple Active Bridge) también son usados para desarrollar topologías de CTP aislados resonantes, debido a las ventajas de conmutación suave que disminuye activamente las perdidas por conmutación en (Chang et al., 2023),(Tran & Dujic, 2016),(Tomas-Manez, Zhang, & Ouyang, 2017),(Tran, Dujić, & Barrade, 2015) y (Krishnaswami & Mohan, 2009). En (Tran & Dujic, 2016) se presenta una topología con cinco celdas de conmutación y un transformador de media frecuencia con tanque resonante LLC serie en cada uno de los puertos. El tanque resonante serie LLC también fue reportado en (Krishnaswami & Mohan, 2009), (Tomas-Manez et al., 2017), (Tran et al., 2015), (Pavlović, Oliver, Alou, Garcia, & Cobos, 2013) siendo de las configuraciones resonantes más comunes para esta aplicación. Por otro lado el autor (Chang et al., 2023) utiliza circuitos resonantes de tipo 2C3L y 2C2L distribuidos en los tres puertos, Este diseño mejora las capacidades de modulación de potencia bidireccional de los convertidores de tres puertos convencionales, lo que permite al convertidor utilizar diferentes convertidores resonantes al cargar o descargar a través de puertos con diferentes niveles de voltaje.

En (Krishnaswami & Mohan, 2008) se desarrolló un CTP con doble puente activo y un puerto rectificador, topología especialmente útil para sistemas con fuentes de energía y sistema de almacenamiento que no requieren un flujo bidireccional en todos los puerto

ISSN: 2992-8338

Tabla 1 Parámetros de diseño reportados en topologías aisladas.

Refs.	Potencia nominal (kW)	Voltaje FV (V)	Voltaje Batería (V)	Voltaje de carga (V)	Frecuencia de conmutación (kHz)	Estructura	Circuito resonante	Número de semi-conductores	Puertos Bi-direccionales	Eff. Promedio
(Tao et al., 2008)	1	54	21-42	400	20	P1S2	No	12	Todos	-
(Zhu et al., 2014)	1.5	80-100	40-45	50	100	P1S2	No	7	Batería	93.9%
(Wu et al., 2020)	150	880-1300	800-1300	1300	20	P1S2	No	12	Todos	98.8%
(Chang et al., 2023)	3	400	280-403	180-213	60-240	P1S2	2C3L 2C2L	12	Todos	94%
(Tran & Dujic, 2016)	500	2000	750	300	5	P1S2	LLC	10	Todos	-
(Tomas-Manez et al., 2017)	1	600	200	400	150	P1S2	LLC	12	Todos	94.7%
(Tran et al., 2015)	250	3600	1500	750	5	P1S2	LLC	6	Todos	-
(Krishnaswami & Mohan, 2009)	0.5	50	36	200	100	P1S2	LLC	12	Todos	91%
(Pavlović et al., 2013)	0.3	390	48	12	700	P1S2	LLC	10	Todos	93%
(Krishnaswami & Mohan, 2008)	0.35	50	36	200	100	P1S2	LLC	12	Batería	91%

Resumen de CTP completamente aislado: El resumen de las topologías de CPT totalmente aislado se presenta en Tabla 1. Estos CTP en su mayoría cuentan con una topología TAB, debido al uso de esta topología la estructura en el flujo de potencia en todos los casos reportados es del tipo 'P1S2'. A su vez se encontraron circuitos resonantes, siendo el más utilizado de tipo LLC.

4. CONCLUSIONES

En el estudio se investigaron los CTP como una solución eficiente y adaptable para integrar sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de energía. Se exploraron cinco estructuras principales para el flujo de potencia: P1S2, P2S2, P1S3-I, P1S3-II y P2S4, analizando su complejidad, eficiencia del sistema y control. Se destacó que la estructura P1S2 muestra la mayor eficiencia, mientras que P2S4 es la más compleja. La simplificación del control es un beneficio clave de la estructura P2S2. Respecto a la realización del control, se encontró que P2S2 es preferible por su simplicidad, P1S2 por su eficiencia y P1S3-I por su rendimiento general superior. En contra parte las topologías P1S3-II y P2S4 son las que presentan más limitaciones y menos ventajas en comparación al resto.

En cuanto a la revisión de CTP aislados, se destacó su amplia aplicación en sistemas de energías renovables conectados a la red, beneficiándose del aislamiento galvánico que ofrecen. Su capacidad de manejar altas potencias y flexibilidad en los niveles de voltaje de cada puerto (Zhang et al., 2016), (Wang et al., 2020), (Md Mejbaul Haque et al., 2023). Se han propuesto diversas topologías completamente aisladas, entre las cuales las derivadas del puente activo doble (DAB) son prominentes. Estas topologías, conocidas como Triple Active Bridge (TAB), se caracterizan por incorporar un tercer puente activo completo. Además, se observa un uso creciente de circuitos resonantes, como el LLC, debido a sus ventajas en términos de altas frecuencias de operación, conmutación suave y reducción de pérdidas. En resumen, la investigación en CTP aislados destacó la importancia de la innovación en topologías y tecnologías de conmutación para mejorar la eficiencia y la fiabilidad de los sistemas de energía renovable.

ISSN: 2992-8338

REFERENCIAS

Arulmozhi, S., & Santha, K. (2020). Review of multiport isolated bidirectional converter interfacing renewable and energy storage systems. *Int J Pow Elec & Dri Syst ISSN, 2088*(8694), 467.

Bhattacharjee, A. K., Kutkut, N., & Batarseh, I. (2018). Review of multiport converters for solar and energy storage integration. *IEEE Transactions on Power Electronics, 34*(2), 1431-1445.

Chang, Y.-N., Yan, Y.-H., & Huang, S.-M. (2023). An Isolated Three-Port Power Converter with 2C3L and 2C2L Resonant Circuits. *Energies, 16*(4), 1830. Retrieved from https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/1830

Europe, S. (2022). Global market outlook for solar power 2022–2026. *Brussels, Belgium*.

Haque, M. M., Wolfs, P., & Alahakoon, S. (2017). *Dual active bridge and matrix converter based three-port converter topology for grid interactive PV-battery system.* Paper presented at the 2017 australasian universities power engineering conference (aupec).

Haque, M. M., Wolfs, P. J., Alahakoon, S., Islam, M. A., Nadarajah, M., Zare, F., & Farrok, O. (2023). Three-port converters for energy conversion of pv-bes integrated systems—a review. *IEEE Access, 11*, 6551-6573.

Krishnaswami, H., & Mohan, N. (2008). *Constant switching frequency series resonant three-port bi-directional DC-DC converter.* Paper presented at the 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference.

Krishnaswami, H., & Mohan, N. (2009). Three-port series-resonant DC–DC converter to interface renewable energy sources with bidirectional load and energy storage ports. *IEEE Transactions on Power Electronics, 24*(10), 2289-2297.

Li, Q., & Wolfs, P. (2008). A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations. *IEEE Transactions on Power Electronics, 23*(3), 1320-1333.

Pavlović, Z., Oliver, J. A., Alou, P., Garcia, Ó., & Cobos, J. A. (2013). *Bidirectional multiple port dc/dc transformer based on a series resonant converter.* Paper presented at the 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).

Tao, H., Kotsopoulos, A., Duarte, J. L., & Hendrix, M. A. (2008). Transformer-coupled multiport ZVS bidirectional DC–DC converter with wide input range. *IEEE Transactions on Power Electronics, 23*(2), 771-781.

Tomas-Manez, K., Zhang, Z., & Ouyang, Z. (2017). *Multi-port isolated LLC resonant converter for distributed energy generation with energy storage.* Paper presented at the 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).

Tran, Y.-K., & Dujic, D. (2016). *A multiport medium voltage isolated DC-DC converter.* Paper presented at the IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

Tran, Y.-K., Dujić, D., & Barrade, P. (2015). *Multiport resonant DC-DC converter.* Paper presented at the IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

Truong, C. N., Viernstein, L., Schimpe, M., Witzmann, R., Jossen, A., & Hesse, H. C. (2017). *Maximizing solar home battery systems' contribution to the energy transition of the power system.* Paper presented at the NEIS 2017; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems.

Wang, Z., Luo, Q., Wei, Y., Mou, D., Lu, X., & Sun, P. (2020). Topology analysis and review of three-port DC–DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics, 35*(11), 11783-11800.

Wu, Y., Mahmud, M. H., Christian, S., Fantino, R. A., Gomez, R. A., Zhao, Y., & Balda, J. C. (2020). A 150-kW 99% efficient all-silicon-carbide triple-active-bridge converter for solar-plus-storage systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 10*(4), 3496-3510.

Zhang, N., Sutanto, D., & Muttaqi, K. M. (2016). A review of topologies of three-port DC–DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56*, 388-401.

Zhu, H., Zhang, D., Athab, H. S., Wu, B., & Gu, Y. (2014). PV isolated three-port converter and energy-balancing control method for PV-battery power supply applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62*(6), 3595-3606.

ISSN: 2992-8338

Impact of Eco-Insulating Cover on Thermal Behavior: Study in an Experimental Module for Cwa Climate from Köppen Climate Classification

Alexa I. Estrada Zuñiga*, E. Sima*, Samanta López Salazar*, R. Alavez-Ramirez, Alejandro Maya***

TecNM/CENIDET, Interior internado Palmira S/N, 62490, Cuernavaca, Morelos.

IPN/CIDIIR, Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oax. C.P. 71230, Mexico

(m23ce022@cenidet.tecnm.mx, efrain.sm@cenidet.tecnm.mx, d18ce057@cenidet.tecnm.mx, ralavez@ipn.mx, d19ce072@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: In regions of warm subhumid climate, direct sun exposure can significantly increase the temperature of both the roof and indoor air, affecting the comfort and energy efficiency of living spaces. The inclusion of an eco-insulating roof offers a promising solution to mitigate this issue by combining reflective properties of solar radiation with heat dissipation capabilities, particularly through coconut fiber filling. This study experimentally analyzes the impact of an eco-insulating roof on the thermal behavior of a concrete slab and indoor air within an experimental module over 72 continuous hours in winter. It was compared against a white sheet roof and an uncovered concrete slab. The eco-insulating roof, composed of a white sheet with coconut fiber filling, managed to reduce the surface temperature of the slab by up to 14.5°C, compared to the 11.9°C reduction achieved with the white sheet alone. Additionally, it lowered the indoor air temperature of the module by 2.2°C compared to the uncovered concrete slab. These results demonstrate the benefits of the eco-insulating roof due to solar radiation reflection and the release of stored heat, improving temperatures by up to 5.7°C during the early hours of the day.

Keywords: eco-insulating roof, coconut fiber, natural fibers, thermal comfort, experimental analysis

1. Introducción

La energía eléctrica es un recurso esencial e integral para el desarrollo de actividades diarias, ya que influye de manera directa en los servicios básicos de los usuarios, la industria, las telecomunicaciones, el transporte, la agricultura, los comercios, hogares y oficinas para estimular el crecimiento y desarrollo económico del país. No obstante, hay diferentes factores que intervienen en el crecimiento de la demanda y el consumo de energía eléctrica, entre ellos los más importantes son: la construcción de viviendas debido al incremento poblacional, los factores climáticos y el uso de materiales de construcción inadecuados para la construcción de la envolvente de los edificios, estos factores impactan directamente en la comodidad lumínica y térmica de los usuarios (SENER, 2021).

En las últimas décadas instituciones gubernamentales y desarrolladores inmobiliarios en conjunto con investigadores en todo el mundo, han desarrollado e implementado estrategias de diseño y materiales de construcción amigables con el medio ambiente, que permitan reducir el consumo de energía destinado a sistemas de climatización de espacios interiores. Estas estrategias se conocen como "sistemas pasivos de climatización", las cuales incluyen: paredes verdes (Sorte et al., 2021), paredes compuestas (Sevilla-Flores et al., 2023), acristalamiento múltiple (Salazar et al., 2024), recubrimientos reflectivos (Cueva-Ortiz et al. 2019) y de baja emisividad (Somasundaram et al. 2020), películas de control solar (Pereira et al., 2019), entre otros. No obstante, dentro de los elementos principales de la envolvente de los edificios, el techo aporta la mayor carga térmica, debido a la exposición directa a la radiación solar (Buildings Energy Data, 2011), por lo tanto, las mejoras de esta componente resultan ser necesarias.

Las estrategias de diseño para techos incluyen: cubiertas verdes (Yan et al, 2023) o reflectivas (Triano-Juarez et al. 2020), techos compuestos por materiales de baja conductividad térmica (Sánchez, 2021), materiales de cambio de fase (Rangel et al., 2022), entre otros. No obstante, recientemente ha crecido el interés por añadir capas secundarias a la cubierta de concreto tradicional; este sistema se le conoce en la literatura como "techo ventilado" (Ciampi et al., 2005).

No obstante, en la actualidad el costo de inversión de un techo ventilado es elevado, debido a esto, en años recientes ha crecido el interés de optar por alternativas más económicas y que presenten un impacto menos agresivo sobre el medio ambiente. En este sentido, Elfaleh et al. (2023) mencionan que la continua investigación en el desarrollo de nuevos métodos y formulaciones optimiza las propiedades y el rendimiento de los materiales constructivos a base de fibras naturales, las cuales son accesibles en el mercado y presentan excelentes cualidades físicas y mecánicas. Dentro de la amplia gama de fibras naturales, las más comunes son: sisal, yute, carpa, bambú, palma y coco, las cuales se pueden incorporar como cubierta secundaria a la losa de concreto.

ISSN: 2992-8338

De acuerdo con De Montellano et al., (2023), los residuos de coco sirven para el desarrollo de materiales de construcción, debido a las características físicas, mecánicas y químicas de la fibra. Además, Syed et al., (2020) mencionan que la fibra de coco es una alternativa mejorada para sustituir el uso de las fibras de asbesto para cubiertas secundarias. Asimismo, la investigación desarrollada por Jayasinghe et al., (2023) muestra que la fibra de coco logra una reducción en la temperatura de hasta 65 %, con respecto a otras fibras naturales. Más adelante, Kumar et al., (2023) mostraron que en presencia de radiación solar la estera de fibra de coco como recubrimiento aislante para techo redujo la ganancia de calor, y presentó un tiempo de retardo de 7 h, además en ausencia de radiación solar reduce la pérdida de calor en 24.5 %, con respecto a un techo de losa de concreto convencional.

Las fibras de coco presentan una serie de ventajas como: resistencia a los hongos y putrefacción, son a pruebas de polillas, no se inflaman fácilmente, no les afecta la humedad, son duraderas, flexibles, recuperan su forma después de un uso constante, son libres de estática, proporcionan buen aislamiento contra el sonido y la temperatura (Ali, 2011). Además, son accesibles en el mercado, puesto que México es el séptimo productor mundial de coco (Gobierno de México, 2023). Por lo tanto, añadir este desecho orgánico a materiales de construcción aporta entre otros beneficios, una reducción significativa en los costos.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar el efecto que una cubierta ecoaislante presenta sobre la temperatura superficial de una losa de concreto reforzado y del aire al interior de un módulo experimental expuesto a condiciones de clima cálido subhúmedo, Cwa, de la clasificación climática de Köppen. La cubierta ecoaislante está compuesta por una lámina recubierta con pintura blanca y relleno de fibra de coco. El análisis comparativo del comportamiento térmico se lleva a cabo con respecto a una cubierta de lámina blanca y la losa de concreto descubierta, durante un periodo experimental de tres días en la época de invierno.

Al contrastar el impacto de la cubierta ecoaislante con una cubierta de lámina blanca y la exposición directa de la losa de concreto, se pueden discernir claramente las diferencias en las temperaturas superficiales y del aire interior. Este análisis comparativo proporcionará una visión clara sobre la eficacia relativa de la cubierta ecoaislante en la reducción de la transferencia de calor y la mejora del confort térmico dentro del módulo experimental.

Es fundamental comparar la temperatura de la superficie interna y externa de la losa, junto con la del aire al interior del módulo experimental, ya que estas mediciones proporcionan una comprensión integral del comportamiento térmico inducido por la cubierta ecoaislante. La temperatura de la superficie externa de la losa refleja la interacción directa con las condiciones ambientales externas, lo que permite evaluar la capacidad de la cubierta para resistir la transferencia de calor desde el exterior hacia el interior del módulo. Por otro lado, la temperatura de la superficie interna ofrece información sobre cómo la cubierta afecta el microclima interior, siendo esencial para entender su eficacia en la regulación térmica y en la creación de un entorno confortable para los ocupantes. Además, la temperatura del aire interior es un indicador clave del confort térmico percibido por los ocupantes, permitiendo evaluar cómo la cubierta influye en la temperatura ambiente dentro del módulo experimental. Al realizar el estudio durante tres días durante el invierno, se capturan las variaciones climáticas específicas que podrían influir en el rendimiento de las diferentes cubiertas, lo que nos proporciona información valiosa para evaluar su efectividad en una variedad de condiciones ambientales.

2. Materiales y métodos

En la Figura 1 se muestra la representación gráfica del módulo experimental que está compuesto por una cavidad de madera de 1 m^3. Las paredes exteriores son de madera tipo OSB de 0.018 m de espesor, y están cubiertas por una capa de pintura blanca reflectante. El interior las paredes está forrado con aislante térmico de 0.025 m de espesor. Los módulos cuentan con una losa de concreto armado de 1.2 m^2 y 0.10 m de espesor. Además, por comodidad para el agarre y movilidad el armado incorpora una agarradera de metal por cada lado.

Con base en el diseño obtenido, se procedió al corte preciso del material y al ensamblaje de los módulos, como se ilustra en la Figura 2.

En el proceso del monitoreo térmico, se realizó la instrumentación de los tres módulos experimentales, asignando el primero como el caso de referencia, techo de losa de concreto (M1), el segundo como techo con una cubierta secundaria de lámina blanca (M2), y el tercero como techo con una cubierta secundaria de lámina blanca y relleno de fibra de coco (M3).

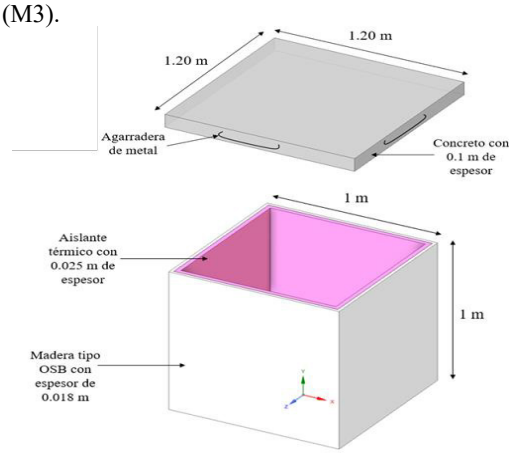


Figura 1. Composición del módulo de pruebas experimentales con losa de concreto.

Para la obtención de mediciones precisas, se utilizaron sensores de temperatura tipo DS18B20 y analógicos NTC, los cuales se conectaron a una placa Arduino MEGA. Los sensores de temperatura antes mencionados son dispositivos utilizados para medir la temperatura en diversos entornos. El dispositivo DS18B20 es un sensor digital de temperatura que tiene la capacidad de medir desde -55 °C hasta 125 °C, con una resolución programable desde 9 bits hasta 12 bits. Por otro lado, el NTC analógico es un sensor de temperatura que consiste en una resistencia con coeficiente de temperatura negativo. En cuanto al Arduino MEGA, con una resolución de 20 bits, es una placa de desarrollo con microcontrolador de código abierto que se usa para integrar y controlar componentes electrónicos, incluyendo sensores. Está equipado con diferentes puertos de entrada y salida, por lo tanto, es

ISSN: 2992-8338

capaz de recibir datos para procesarlos y posteriormente analizarlos. Asimismo, la programación de este componente permite configurar la adquisición de datos y la comunicación con otros sistemas en tiempo real.

Los tres módulos experimentales incorporan 13 sensores tipo analógicos NTC, la distribución de los sensores es como se muestra en la Figura 7. Por otro lado, cuentan con 20 sensores digitales tipo DS18B20 colocados sobre la superficie interna de las paredes que conforman cada módulo experimental, entre la madera y el aislante térmico. Por último, cada losa de concreto incorpora tres sensores de temperatura tipo T colocados de manera vertical a tres posiciones, inferior, media y superior de la losa. Asimismo, a la placa Arduino MEGA se incorporó un reloj y una memoria de almacenamiento para la adquisición de datos.

La incertidumbre de los sensores empezando por el termopar tipo T va desde ±0.5 °C hasta ±2 °C. En cambio, el termistor tipo DS18B20 tiene una incertidumbre de ±0.5 °C. La disparidad en las incertidumbres sugiere la necesidad de analizar e interpretar cuidadosamente los datos experimentales, reconociendo las limitaciones de cada tipo de sensor y el potencial impacto en la validez de las conclusiones extraídas. La comprensión y mitigación de estas incertidumbres son fundamentales para garantizar la integridad y utilidad de los datos recopilados.



Figura 2. Construcción de los módulos de prueba experimentales.

La Figura 3 muestra la colocación de la cubierta ecoaislante sobre la losa de concreto de un módulo experimental situado en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), campus mecánica, ubicado en Cuernavaca, Morelos. Cuernavaca se ubica al noroeste del estado de Morelos y tiene una extensión territorial de 199.7 Km², que representa el 4.1 % de la extensión territorial del estado, se localiza geográficamente al norte a una latitud de 19°01’29”, al sur a 18°50’31”, al este a una longitud de -99°10’50” y -99°20’31” al oeste. La clasificación climática de Köppen-Geiger identifica este patrón de clima perteneciente a la categoría de Cwa, (García, 2004). Los módulos experimentales están orientados en dirección norte-sur.

Una vez establecida la asignación de sensores, ubicación y la distribución de los módulos experimentales, en la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo en el software de Arduino. Este algoritmo es una serie de comandos de programación que le dirán al microcontrolador como configurarse al iniciarse y qué acciones tiene que realizar mientras esté en funcionamiento.



Figura 3. Posición de la cubierta ecoaislante sobre la losa de concreto en el módulo de pruebas experimentales.

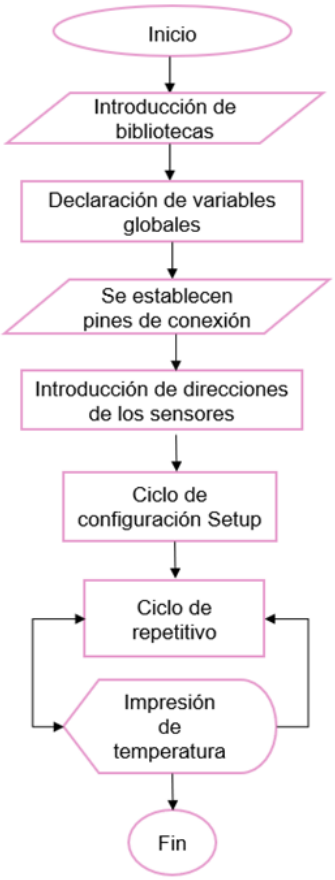


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de adquisición de datos en arduino.

ISSN: 2992-8338

Posteriormente, utilizando cable UTP, sensores y equipo de soldar, se procedió a ensamblar cada uno de los módulos. Después, se realizó el etiquetado y se hicieron pruebas para verificar el funcionamiento de los sensores y el sistema de adquisición.

En la Figura 5, se muestra la disposición de la instrumentación dentro de los módulos experimentales. Una vez centrados los puntos de colocación se fijaron dos sensores digitales con cinta industrial en la parte central de la madera OBS pasándolos por medio de un orificio en la parte del centro del aislante térmico. Asimismo, se colocó el aislante térmico añadiendo pegamento liquido industrial sobre toda la superficie para adherirlo a la madera, también, se incorporaron los otros dos sensores digitales en la parte central del aislante térmico fijándolos con cinta industrial. El proceso antes mencionado se realizó con cada una de las caras de los módulos experimentales.

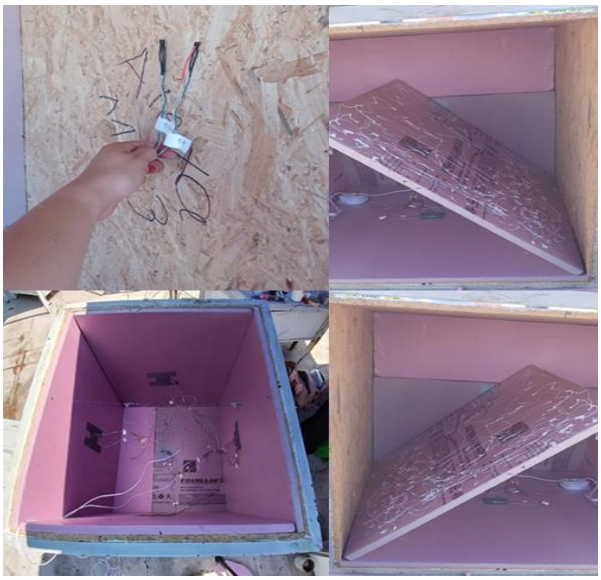


Figura 5. Colocación de los sensores de temperatura sobre las superficies laterales del módulo experimental.



Figura 6. Colocación de los sensores sobre la losa y posicionamiento sobre los módulos experimentales.

Posteriormente, se colocaron los sensores analógicos en la parte interna de cada módulo, estos sensores se apoyaron por un alambre delgado de inoxidable en la parte central y el cableado se pegó con cinta industrial para prevenir que estos se movieran.

Una vez colocados y orientados los módulos experimentales junto con las losas, se colocó un sensor analógico en la parte central de cada cara de la madera OBS de los tres módulos y uno en la parte superior central de la losa de concreto. Sin embargo, el (M2) dispuso de otro sensor en la parte inferior central de la lámina y el (M3) de uno entre la lámina y el coco.

Una vez terminada la instrumentación interna, se prosiguió con el levantamiento de losas por medio de una grúa para colocar los módulos en la parte inferior, asimismo, al momento de levantar cada una de las losas, se colocó un sensor analógico en la parte inferior central de la losa, ver Figura 6.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos del primer monitoreo térmico revelan variaciones significativas en la temperatura de la superficie exterior e interior de una losa de concreto para tres configuraciones de techo distintas: convencional sobre M1, con cubierta de lámina sobre M2 y con cubierta de lámina y relleno de fibra de coco sobre M3. Los resultados presentados a continuación corresponden al monitoreo de temperatura durante tres días, correspondientes al periodo del 8 al 11 de marzo de 2023.

En las Figuras 7 y 8, se aprecian notables diferencias de temperatura en ambas superficies de la losa de concreto entre las configuraciones de techo analizadas. La configuración convencional sobre M1 exhibe la mayor fluctuación de temperatura, con valores extremos de 46.8 °C y 12.4 °C en la superficie externa, ver Figura 7. En contraste, la configuración M2 muestra una menor variación de la temperatura, con una temperatura máxima y mínima de 34.9 °C y 17.2 °C, respectivamente. El M2 presenta un pico de temperatura más bajo y, durante la madrugada, registra temperaturas más elevadas que la configuración sobre M1. No obstante, la configuración de techo con cubierta ecoaislante (M3) destaca al lograr el pico de temperatura mínima (32.3 °C) y la temperatura máxima en ausencia de radiación solar (19.5 °C). Este diseño evita el exceso de ganancia de calor durante el día y permite una liberación gradual de calor absorbido en la madrugada, reduciendo la pérdida de calor y, por ende, manteniendo temperaturas más moderadas en comparación con las otras configuraciones.

Los resultados indican que la cubierta ecoaislante reduce la temperatura, de la superficie exterior, máxima hasta 14.5 °C durante las horas de mayor radiación solar (12:00 – 16:00 h), mientras que en la madrugada, aumenta la temperatura de la losa de concreto hasta en 7.1 °C. Sin el relleno de fibra de coco, la configuración muestra una reducción de solo 11.9 °C en la temperatura máxima y un aumento de 4.8 °C en la temperatura mínima, ambas con respecto al techo de concreto.

La Figura 8 presenta el comportamiento de la temperatura en la superficie interior de la losa de concreto, reflejando un patrón similar al observado en la superficie exterior. La cubierta ecoaislante sobre M3 presenta una reducción de temperatura de hasta 12.8 °C en presencia de radiación solar y un aumento de temperatura de hasta 6.8 °C en la madrugada, esto con respecto a la loa de concreto descubierta. Estos resultados resaltan los beneficios significativos de la cubierta ecoaislante, especialmente en presencia de radiación solar.

ISSN: 2992-8338

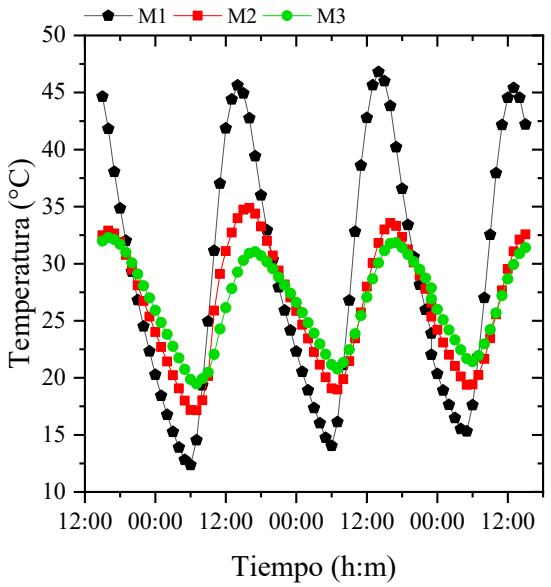


Figura 7. Comportamiento de la temperatura de la superficie externa de la losa de concreto.

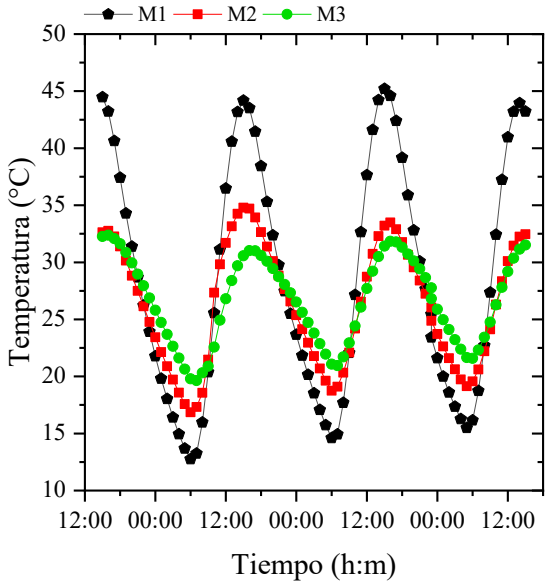


Figura 8. Comportamiento de la temperatura de la superficie interna de la losa de concreto.

En cuanto a la temperatura del aire al interior de los módulos experimentales (Figura 9), se observa una diferencia menor entre las configuraciones. Sin embargo, cuantitativamente, la cubierta ecoaislante reduce la temperatura máxima en 2.2 °C y aumenta la temperatura mínima en 5.7 °C. Este comportamiento contrasta con las variaciones observadas en las superficies externa e interna de las losas, ya que la cubierta ecoaislante presenta una mejora sustancial de la temperatura en ausencia de radiación solar.

La cubierta ecoaislante presenta un efecto significativo en la reducción de la temperatura superficial de la losa de concreto en comparación con una losa descubierta. Durante las horas de mayor radiación solar, la cubierta ecoaislante reduce la temperatura superficial hasta en 14.5 °C en comparación con la losa descubierta. Esto indica una reducción considerable en la ganancia de calor del material expuesto directamente al sol. Además, durante la madrugada, la cubierta ecoaislante facilita una liberación gradual de calor absorbido durante el día, lo que resulta en temperaturas más moderadas en comparación con la losa descubierta, donde la temperatura puede aumentar hasta en 7.1 °C. Estos efectos indican que la cubierta ecoaislante ayuda a mantener la temperatura de la losa de concreto dentro de un rango más confortable tanto durante el día como durante la noche, en comparación con una losa descubierta expuesta a condiciones climáticas similares.

Por lo tanto, la cubierta ecoaislante emerge como una estrategia eficaz para mitigar las fluctuaciones de temperatura, logrando una regulación térmica más eficiente y sostenible. Es importante destacar que los resultados presentados abarcan un intervalo de tiempo relativamente breve durante el periodo invernal. No obstante, el monitoreo tiene la intención de extenderse a períodos con temperaturas exteriores más elevadas, lo cual permitirá apreciar de manera más completa y detallada cómo la presencia del techo con relleno de fibra de coco contribuye a una mejora aún más significativa en la reducción de la temperatura en el módulo experimental.

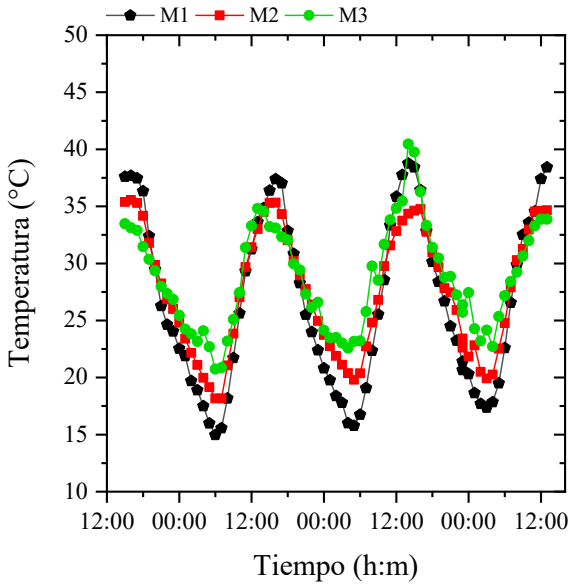


Figura 9. Comportamiento de la temperatura del aire al interior de los módulos experimentales.

4. Conclusiones

En este estudio se analizó el impacto que una cubierta ecoaislante, lamina con relleno de fibra de coco, tiene sobre la temperatura de una losa de concreto en un módulo experimental expuesto a condiciones de clima cálido subhúmedo, Cwa de la clasificación climática de Köppen. Se analizó el comportamiento de la temperatura sobre la superficie externa e interna de la losa de concreto y el aire al interior del módulo de pruebas experimentales. El desempeño térmico de la cubierta ecoaislante se comparó con respecto a una cubierta de lámina blanca y una losa de concreto tradicional descubierta. Con base en lo anterior, se presentan las siguientes conclusiones:

ISSN: 2992-8338

- Se observó una reducción significativa en la temperatura de la superficie externa de la losa de concreto y en la temperatura interna del módulo experimental con la cubierta ecoaislante en comparación con las otras configuraciones. La lámina blanca logró una reducción de hasta 11.9 °C en la temperatura máxima de la superficie externa, principalmente debido a su capacidad reflectante, pero no pudo mantener una regulación térmica eficiente en ausencia de radiación solar. En cambio, la cubierta ecoaislante demostró una notable eficacia al reducir la temperatura de la superficie externa máxima de la losa hasta en 14.4 °C y la temperatura máxima de la superficie interna en 12.8 °C. Además, contribuyó a una reducción de 2.2 °C en la temperatura del aire interior en comparación con la losa descubierta.
- Un aspecto destacado fue la capacidad de la cubierta ecoaislante para mantener una temperatura interior más estable en ausencia de radiación solar, mejorando hasta en 5.7 °C en comparación con la losa de concreto descubierta.
- La inclusión del relleno de fibra de coco en la cubierta de lámina blanca emergió como una estrategia efectiva para mitigar las fluctuaciones de temperatura, logrando una regulación térmica más eficiente y sostenible en entornos experimentales.

Referencias

Demanda y consumo 2021-2035.SENER secretaria de energía, Elaborado por Sener información de CENACE. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/649612/PRODESEN_CAP_TULO-4.pdf

Sorte, P. D. B., Silva, C. F. E., Calixter, A. L., & Romero, M. A. B. (2021). Green Walls as an Environmental Strategy. En Advances in geospatial technologies book series (pp. 294-328). https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2249-3.ch010

Sevilla Flores, K. ., & Paniagua Hernández, V. (2023). Diseño de panelería prefabricada en bambú para paredes en Costa Rica: caracterización mecánica preliminar . Revistarquis, 13(1), 126–154. https://doi.org/10.15517/ra.v13i1.55602

Salazar, S. L., Sima, E., Vargas-López, R., Yang, R., Liu, D., & Hernández-López, I. (2024). Assessing different glazing types for energy savings and CO2 reduction in a tropical climate: A comparative study. Journal Of Building Engineering, 82, 108188. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108188

Cueva Ortiz, David (2019). Análisis energético y económico del recubrimiento térmico reflectivo (ThermaCote) en edificios de España.. Tesis (Master), E.T.S.I. de Minas y Energía (UPM).

Somasundaram, S., Chong, A., Zhang, W., & Thangavelu, S. R. (2020). Energy saving potential of low-e coating based retrofit double glazing for tropical climate. Energy And Buildings, 206, 109570. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109570

Pereira, J. L. F., Gomes, M. G., Rodrigues, A. M., & Almeida, M. (2019a). Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making. Energy And Buildings, 198, 431-443. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.003

U.S. Department of Energy, 2011 Buildings Energy Data Book, 2012, p. 286.

Yan, F., Du, X., Zhao, H., Hao, M., & Xu, X. (2023). Assessment of green roofs' potential to improve the urban thermal environment: the case of Beijing. Environmental Research, 237, 116857.

Triano-Juárez, J., Macías-Melo, E., Hernández-Pérez, I., Aguilar-Castro, K., & Xamán, J. (2020). Thermal behavior of a phase change material in a building roof with and without reflective coating in a warm humid zone. Journal of Building Engineering, 32, 101648

Sánchez, R. P. (2021). Combatiendo el frío en Ticlio Chico: el Tetra Brick como aislante térmico para las viviendas. Pluriversidad, 8, 161-182. https://doi.org/10.31381/pluriversidad.v1i8.4587.

Rangel, C. G., Rivera-Solorio, C. I., Gijón-Rivera, M., & Mousavi, S. (2022). The effect on thermal comfort and heat transfer in naturally ventilated roofs with PCM in a semi-arid climate: an experimental research. Energy and Buildings, 274, 112453.

Ciampi, M., Leccese, F., & Tuoni, G. (2005). Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. Solar Energy, 79(2), 183-192. https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.014

Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Girard, C. (2023b). A comprehensive review of natural fibers and their composites: an eco-friendly alternative to conventional materials. Results in Engineering, 19, 101271.

De Montellano Andres, G. S. O., Aguilar-Sierra, S. M., & Graziella, B. (2023). Morphological, physical, and chemical characterization of coconut residues in Ecuador. Heliyon, 9(9), e19267.

Syed, H., Nerella, R., & Madduru, S. R. C. (2020). Role of coconut coir fiber in concrete. Materials Today: Proceedings, 27, 1104-1110.

Jayasinghe, R., Abeyrathna, W., Jayasingha, K. R., De Silva, A. R., & Halwaturaa, R. U. (2023). Developing a low-cost thermally insulated ceiling sheet system using coir fibre.

Kumar, T. S., Shafi, K. A., Thomas, R. J., & Mohammed, J. (2023). Experimental evaluation of the thermal performance of coir mat and green facade as wall insulation in a tropical climate. Thermal Science and Engineering Progress, 40, 101757.

Alí, M. (2011). Fibra de coco: un material versátil y sus aplicaciones en ingeniería. Revista de ingeniería civil y tecnología de la construcción, 2 (9), 189-197.

De Agricultura Y Desarrollo Rural, S. (s. f.). Producción de copra y coco en México. gob.mx.

García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía. http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/1372

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Dividing Wall Column for debottlenecking presented by conventional distillation columns

Elsa Hynmar Fernández Martínez*. Dulce Citllalli Muñoz Angelino* Brian Manuel González Contreras*

**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: Dividing Wall columns are considered an excellent option for retrofitting conventional distillation systems when it is desired to increase process capacity. This results in the occurrence of bottlenecks, which limit the operation of the separation process, and decrease product quality and energy efficiency. Steady-state simulations were carried out in UniSim Design of Liquefied Natural Gas fractionation to obtain pure Ethane and Propane products. Different parallel and series configurations were considered integrating the Top Dividing Wall Column, which increases energy efficiency, obtains high purities, and eliminates bottlenecks. This work provides significant contributions in the use of the Dividing Wall Column, which decreases the separation energy and the investment and operation costs of the process, generating an intensified and sustainable distillation.

Keywords: Dividing Wall Column, Debottlenecking, Natural Gas Liquid, Retrofit, Distillation.

1. INTRODUCCIÓN

La operación unitaria de separación más importante en las industrias química y de refinería es la destilación. El sector de procesos ha puesto su atención en este proceso de separación en términos de capacidad instalada y consumo energético. Por este motivo es necesario mejorar la eficiencia energética con la finalidad de que el proceso de destilación sea sostenible; esto se logra con la modernización o re-acondicionamiento tanto de procesos como de equipos ya existentes. En la destilación el buen funcionamiento de los condensadores y rehervidores es fundamental, debido a que la energía de separación depende de estos intercambiadores de calor; así también, los equipos internos de las columnas como platos y empaques; que, dependiendo de la elección de cada tipo, mejoran la hidrodinámica y la transferencia de masa, evitando así inundaciones; siendo ésta, una de las características de los cuellos de botella. La optimización de procesos, la modernización de sistemas para hacerlos eficientes y sostenibles, y la aplicación de tecnologías emergentes son áreas de importancia en los procesos de separación.

La destilación es un proceso ampliamente utilizado para la separación de componentes en mezclas líquidas. Sin embargo, son consideradas intensivas (Segovia-Hernández, et al., 2021), es decir, que consumen una cantidad considerable de energía para llevar a cabo la separación y purificación de componentes. Cuando se desea incrementar la capacidad operativa en una columna de destilación, el equipo existente presenta problemas de cuellos de botella, por lo que se requiere de un re-acondicionamiento o modernización del mismo.

En destilación, los cuellos de botella se presentan cuando existe una restricción en un componente o un equipo del sistema que limitan la capacidad o rendimiento global (Van Duc Long y Lee, 2011), lo que produce una reducción de la eficiencia, un aumento en el consumo de energía o bajas purezas de los productos. Los estudios de Van Duc Long et al. (2010) y Van Duc Long y Lee (2011) muestran la síntesis de diferentes configuraciones y entre ellas algunas columnas térmicamente acopladas con la columna de pared divisoria (DWC, por sus siglas en inglés), con la cual se pueden resolver los cuellos de botella en el proceso de purificación de ácido acético cuando se incrementa la capacidad del proceso. Otro estudio de caso se muestra en Van Duc Long y Lee (2011), donde la DWC puede utilizarse con éxito en la separación de mezclas azeotrópicas, entre la acetona y el metanol, demostrando su versatilidad y eficacia en la optimización de procesos de destilación extractiva.

Una vaporización previa de la alimentación para la separación de aromáticos (Benceno-Tolueno-Xileno, BTX) reduce el flujo del vapor y líquido a través de la columna extractiva, lo que produce que se reduzca la caída de presión y la carga térmica en el rehervidor y dando como consecuencia que se eliminen los cuellos de botella (Rewatkar et al., 2022). El estudio de Van Duc Long y Lee (2013a) demuestra que el re-equipamiento mediante un análisis tecnoeconómico de una columna de corriente lateral a una DWC, aumenta la capacidad del proceso de separación y al mismo tiempo se generan ahorros energéticos. En Long y Lee (2015) se llevó a cabo un análisis tecno-económico híbrido de una columna térmicamente acoplada asistida por una bomba de calor (HPTCDS, por sus siglas en inglés) y los resultados demostraron que es posible resolver el problema de cuellos de botella en la columna y tener ahorros significativos en la energía de separación.

El re-acondicionamiento se presenta como una solución efectiva para abordar los problemas de cuellos de botella en procesos de destilación, como se demuestra en el estudio de caso del fraccionamiento de Gas Natural Licuado (GNL). En

ISSN: 2992-8338

este caso, se considera el uso de sistemas de destilación térmicamente acoplados, como la columna Petlyuk (Van Duc Long y Lee, 2011). La modernización de una planta existente permite alcanzar los siguientes objetivos: reducción de los cuellos de botella del proceso para aumentar el rendimiento de la planta; ahorros energéticos; mejoramiento de productos y materia prima; así como el cumplimiento de la normativa medioambiental. (Amminudin y Smith, 2001). Para el descongestionamiento de cuellos de botella en los sistemas de destilación existentes, añadir una nueva columna o instalar una nueva columna en paralelo no suele ser rentable. (Amminudin y Smith, 2001), pero se considera para destacar la modernización del proceso. La optimización de las operaciones de destilación, el aumento del rendimiento, la mejora de la calidad del producto y la reducción de los costos operativos dependen de la localización y resolución de los cuellos de botella (Van Duc Long y Lee, 2011). En el proceso de recuperación de NGL la columna de pared divisoria con pared superior (TDWC) puede ofrecer muchos beneficios al sistema, por ejemplo, reducir el costo de operación, incluido el costo de refrigeración, y minimizando las cargas térmicas del re-hervidor y del condensador (Long y Lee, 2012).

El objetivo principal del re-equipamiento en un proceso de destilación consiste en aprovechar al máximo los equipos existentes, reduciendo la cantidad de equipo nuevo y con ello disminuyendo los costos de inversión, esto sugiere el uso de los sistemas de destilación térmicamente acoplados como la DWC; asimismo, puede añadirse un pre-fraccionador o un post-fraccionador (Van Duc Long et al., 2010)

El diseño óptimo para la modernización de una columna existente en una configuración compleja incluyendo una DWC no sólo ahorra una cantidad significativa de energía, sino que también aumenta la capacidad del proceso de separación (Van Duc Long y Lee, 2013b). La metodología de optimización de superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés) permite adaptar una columna de destilación extractiva convencional a un esquema de destilación extractiva acoplada térmicamente (TCEDSASR). Este re-acondicionamiento muestra que es posible lograr importantes ahorros de energía (Van Duc Long y Lee, 2013c). El uso y la aplicación de secuencias de destilación térmicamente acopladas (TCDS, por sus siglas en inglés) y de la DWC en la modernización de una planta de destilación azeotrópica y extractiva muestra una reducción notable en términos de costos operativos y de energía (Long y Lee, 2014). Long et al., (2016) propone un análisis tecno-económico para modernizar el fraccionamiento de GNL mediante un esquema de HPTCDS y así poder detectar cuellos de botella con la finalidad de mejorar la eficiencia energética (Minh et al., 2012).

El objetivo de este trabajo es evaluar la eficiencia energética y la viabilidad de la implementación de TCDS como la DWC, como alternativa para eliminar o disminuir los problemas de cuellos de botella observados en las columnas de destilación convencionales mediante la simulación en UniSim Design para el fraccionamiento de GNL y así obtener Etano y Propano puros. La congestión, o "cuello de botella", ocurre cuando la capacidad de separación de la columna se ve comprometida, estos cuellos de botella pueden afectar significativamente la eficiencia energética y la viabilidad económica de los procesos.

Dada la complejidad y los desafíos asociados con la congestión de cuellos de botella en columnas de destilación convencionales, se plantea la hipótesis de que la implementación de los TCDS pueden ofrecer una solución efectiva para eliminar o disminuir los cuellos de botella en estos sistemas. Esta hipótesis se probará a través de la evaluación detallada de diferentes casos de estudio utilizando simulaciones en UniSim Design para el fraccionamiento de Gas Natural Licuado y obtener como productos puros Etano y Propano. Se espera que los resultados de este trabajo contribuyan al desarrollo de nuevas estrategias y tecnologías para la prevención y eliminación de cuellos de botella en columnas de destilación, lo cual podría tener un impacto significativo en la eficiencia energética y sostenibilidad de los procesos químicos y la viabilidad económica de los procesos de destilación, al tiempo que mantienen o mejoran la calidad de los productos finales.

1.1 Ventajas en el uso de columnas de pared divisoria

Las DWC son sistemas de destilación térmicamente acoplados que presentan varias ventajas con respecto a los sistemas convencionales, como ahorros en los consumos energéticos (hasta un 30%), reducción de costos de inversión y operación, ocupan menos espacio, mejoran la calidad y el rendimiento de los productos, incrementan las purezas, entre otras. Existen más de 90 aplicaciones y más de 100 DWC operando a escala industrial (Asprion y Kaibel, 2010; Dejanović et al., 2010). La DWC se emplea para separar sistemas ternarios, por lo que en una sola columna es posible obtener los tres productos con altas purezas, a diferencia de un sistema convencional donde que se requieren 2 columnas para separar los mismos tres componentes. La Figura 1 muestra el esquema de destilación Petlyuk (lado izquierdo), la cual es termodinámicamente equivalente a la DWC (lado derecho). La primera se emplea para llevar a cabo las simulaciones, mientras que la segunda se implementa operativamente. Los ahorros logrados con este sistema se deben a que entre las dos columnas del sistema Petlyuk (prefraccionador y columna principal) se han eliminado el condensador y el re-hervidor y en su lugar existen 4 corrientes, 2 corrientes de vapor y 2 corrientes de líquido, las cuales integran el calor entre ambas columnas y se logra la separación deseada.

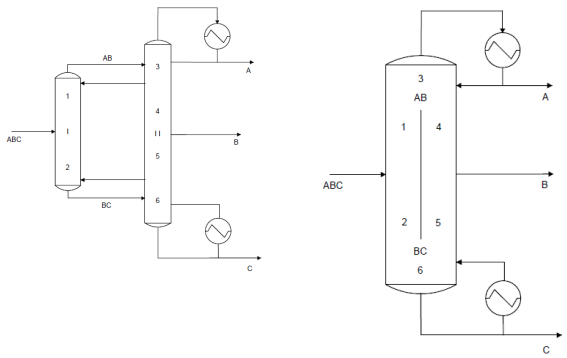


Figura 1. Sistema Petlyuk y DWC

ISSN: 2992-8338

En la DWC, el prefraccionador se encuentra del lado izquierdo de la pared, mientras que al lado derecho está la columna principal y los flujos de líquido y vapor pasan por arriba y por debajo de la pared.

La pared de la DWC puede estar localizada en la parte superior (TDWC) y los dos productos con menores volatilidades se obtienen en el domo de la columna y el componente clave pesado sale en el fondo. Cuando la pared se localiza en la parte inferior de la columna (BDWC) Los productos pesados se obtienen en el fondo de la columna y sólo se obtiene el producto con baja volatilidad en el domo de la columna (Ver Figura 2).

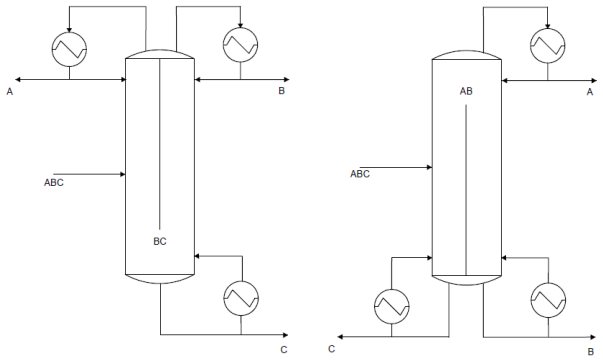


Figura 2. DWC con pared superior y con pared inferior.

1.2 Análisis de los cuellos de botella en columnas de destilación convencionales

Los cuellos de botella se presentan en destilación cuando existen *limitaciones en la capacidad*, esto tiene que ver con el flujo de alimentación y la eficiencia de separación de los componentes, generándose índices bajos de producción; *limitaciones hidráulicas* producidas por inundación de la columna o platos o por la limitación de capacidad de condensadores y rehervidores, disminuyéndo el rendimiento de la columna; *pureza o recuperación de productos*, se produce cuando no se alcanzan las purezas o recuperaciones deseadas por el diseño o las condiciones de operación de la columna; *consumo energético* cuando existe un uso ineficiente de energía en condensadores y rehervidores y dificultan la eficiencia global de la destilación.

Identificación de cuellos de botella. Los cuellos de botella se detectan al llevar a cabo una evaluación de la capacidad máxima de caudal de alimentación y las limitaciones operativas del proceso de destilación existente. Esta evaluación ayuda a identificar los puntos en el proceso en los que los equipos instalados podrían restringir caudales más elevados y disminuir la eficiencia global.

Estrategias aplicadas para descongestionar cuellos de botella. Para resolver los problemas de cuellos de botella identificados se sugieren soluciones de descongestionamiento que incluyen el uso de columnas de destilación térmicamente acopladas, como las columnas de pared divisoria. La investigación pretende demostrar cómo estas técnicas pueden mejorar la eficiencia energética y ahorrar en los costos de operación maximizando la distribución interna de los flujos de interconexión a lo largo de la pared divisoria, examinando los diversos escenarios (Van Duc Long et al., 2010)

2. METODOLOGÍA

El estudio de caso considera la separación de Etano y Propano de una corriente de Gas Natural Licuado (GNL) mediante el arreglo de dos columnas convencionales por separación directa, denominadas desetanizadora y despropanizadora como se muestra en la Figura 3. Las simulaciones en estado estacionario se llevaron a cabo en UniSim Design R492 y se empleó la ecuación de estado cúbica de Peng-Robinson para predecir el Equilibrio Líquido-Vapor de los hidrocarburos. Al sistema de destilación entra una alimentación de hidrocarburos C_1-C_7 con las condiciones especificadas en Van Duc Long y Lee (2011).

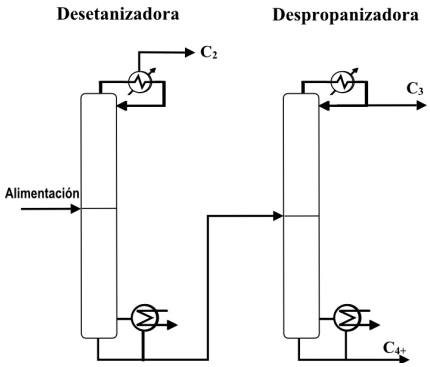


Figura 3. Des-etanización y des-propanización del GNL mediante destilación convencional.

El condensador parcial de la columna desetanizadora opera a 30.98 bar, debido a las propiedades termodinámicas del Etano; con una caída de presión a través de la columna de 0.49 bar. La columna cuenta con 18 platos teóricos más condensador y rehervidor, la etapa de alimentación es la 11; mientras que el condensador de la despropanizadora opera a 17.50 bar y el re-hervidor a 18.10 bar, esta columna cuenta con 36 etapas incluyendo el condensador y re-hervidor y la alimentación es la etapa 22; este diseño fue tomado de Van Duc Long y Lee (2011) para fines comparativos de simuladores. La presión es una variable relevante en el fraccionamiento de GNL, debido a que impacta directamente en los costos operativos de las columnas.

Se desean obtener purezas y recuperaciones para el Etano y Propano de 94% y 90% mol y de 94% y 92% respectivamente. Los porcentajes de inundación máxima de diseño para la desetanizadora y despropanizadora son de 86 y 83.5 respectivamente. El aumento de la capacidad de la planta requiere el re-acondicionamiento del sistema de destilación convencional y las primeras modificaciones que se proponen son la adición de columnas en serie y en paralelo, esto quiere decir que al sistema de destilación convencional existente se añadirán otra desetanizadora y otra despropanizadora. Con la finalidad de eliminar o disminuir los cuellos de botella en el esquema convencional para reducir la energía de separación, se proponen diferentes esquemas de re-acondicionamiento incluyendo los sistemas de destilación térmicamente acoplados como las DWC.

ISSN: 2992-8338

2.1 Configuración en paralelo

El primer re-acondicionamiento que se lleva a cabo consiste en agregar un par de columnas destilación (desetanizadora y despropanizadora) en paralelo con un diseño igual al de columnas existentes, tal como se muestra en la Figura 4. La experiencia dicta que la configuración en paralelo muestra menores costos de inversión , así como de consumos energéticos con respecto a la configuración en serie. Aunque el adicionar columnas a las ya existentes representa un costo de inversión adicional, estos esquemas sirven de referencia en este estudio para cuantificar la eficiencia de la modernización. Se analizaron los porcentajes de distribución de las corrientes A y B para visualizar su efecto en las cargas térmicas del re-hervidor y condensador, con proporciones 50-50, 20-80 y 80-20.

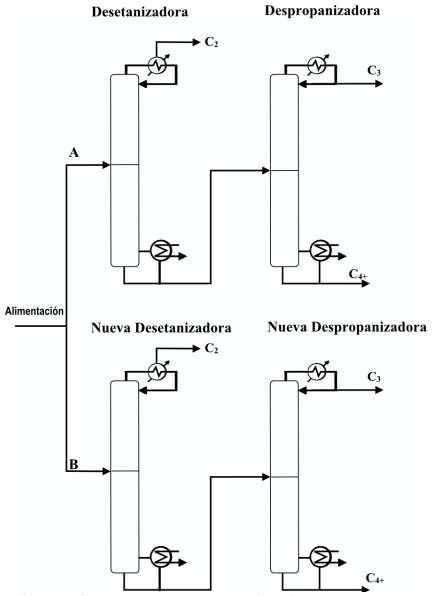


Figura 4. Esquema de destilación en paralelo.

2.2 Configuración en serie

Aún cuando este esquema en serie muestra mayores incrementos tanto en consumo energético como en costos de inversión para su implementación, se consideró con fines comparativos. En la Figura 5 las columnas 1 y 3, de izquierda a derecha son las desetanizadoras y las columnas 2 y 4 las despropanizadoras. Y los diseños de las columnas 3 y 4 son iguales a los de las columnas existentes.

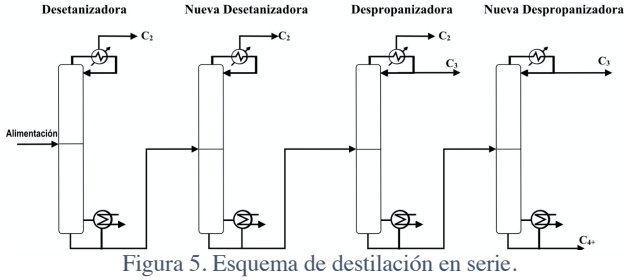


Figura 5. Esquema de destilación en serie.

2.3 Configuración adicionando la TDWC

Debido a las ventajas que presentan las columnas DWC, una de las propuestas en el re-acondicionamiento para incrementar la capacidad del sistema de fraccionamiento de GNL es utilizar el esquema en paralelo, pero en la corriente B adicionar una TDWC como se presenta en la Figura 6. De manera semejante a la configuración en paralelo presentada anteriormente con los sistemas convencionales, se utilizaron las mismas distribuciones para las corrientes A y B.

La razón de usar una TDWC en lugar de una CDWC o una BDWC se debe a que la desetanizadora opera a una presión superior que la despropanizadora, esto con la finalidad de que el Etano pueda condensarse con un refrigerante, debido a sus propiedades termodinámicas. Al tener dos condensadores en la parte superior, esto hace posible la separación de ambos compuestos con altas purezas en el domo de la TDWC. La presión a la que operan los condensadores de la TDWC es de 17.5 bar para minimizar el consumo energético y disminuir los costos de inversión, la caída de presión a través de la columna es de 0.6 bar. A esta presión, la desetanizadora requiere de más servicios de enfriamiento, pero al mismo tiempo el diámetro de la columna es menor, por lo que la carga térmica del re-hervidor disminuye con respecto a una columna con mayor presión (Van Duc Long y Lee, 2011). Además el espesor de las paredes de la columna son menores, debido a la baja presión.

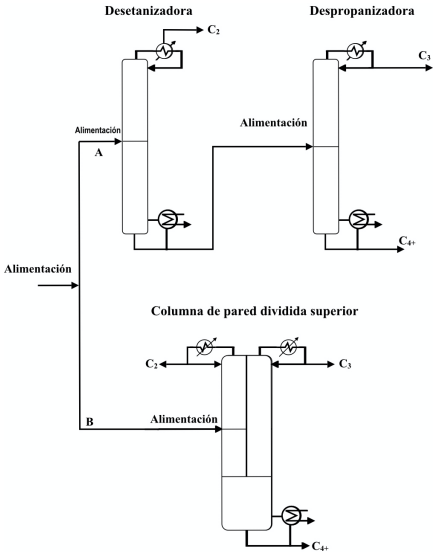


Figura 6. Esquema de destilación en paralelo adicionando una TEDWC.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Sistema convencional

Los cuellos de botella se presentan al incrementar 25% la capacidad del proceso de fraccionamiento de GNL, esto se refleja en los porcentajes máximos de inundación, debido a que en la desetanizadora se incrementó un 22% sobre el valor de diseño; mientras que para la despropanizadora hubo un aumento del 20% aproximadamente.

ISSN: 2992-8338

El perfil de composiciones de la desetanizadora en el sistema convencional de la Figura 7 muestra dos efectos de remezclado para el Propano, este puede distinguirse porque la composición alcanza un máximo en la etapa 9, luego disminuye en la etapa 12, posteriormente se incrementa en la etapa 17 y finalmente desciende en la etapa 19. Este comportamiento produce que los consumos de energía sean mayores y con la implementación de la DWC se eliminan o disminuyen. Asimismo, otra de las características para re-acondicionar el sistema con la columna DWC es que la composición del propano debe ser mayor al 30% molar, que para este caso se encuentra en 44%.

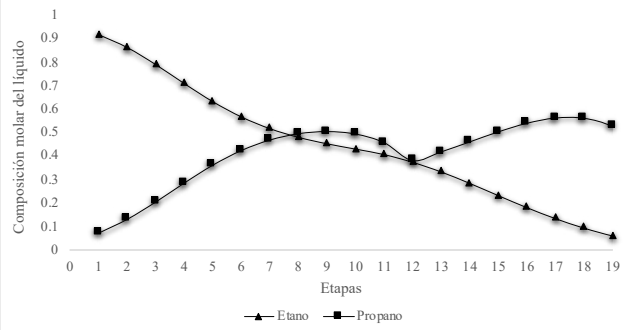


Figura 7. Perfiles de composición del líquido en la columna desetanizadora del sistema convencional.

3.2 Configuración en paralelo

Los resultados de las tres distribuciones propuestas muestran los mismos valores en las cargas térmicas tanto en el condensador como del re-hervidor, por lo que no hay efecto en las distribuciones de las corrientes A y B. Las purezas y las recuperaciones de los productos en los tres casos son las especificadas para el diseño.

Tabla 1. Cargas térmicas de los sistemas en paralelo

Tipo de sistema	Desetanizadora						
	Convencional	Paralelo 50/50		Paralelo 20/80		Paralelo 80/20	
Corriente		A	B	A	B	A	B
QC [Gcal/h]	14.16	7.08	7.08	2.83	11.33	11.33	2.83
QR [Gcal/h]	26.45	13.23	13.22	5.29	21.16	21.16	5.29
	Despropanizadora						
QC [Gcal/h]	20.34	10.17	10.17	4.07	16.27	16.27	4.07
QR [Gcal/h]	16.15	8.07	8.08	3.23	12.92	12.92	3.23

3.3 Configuración en serie

Los perfiles de composición del líquido de la Figura 8 muestran que en la nueva desetanizadora en serie hay efectos de remezclado, los cuales incrementan las cargas térmicas en condensador y re-hervidor. Se obtuvieron las purezas y recuperaciones especificadas y se observó que en la nuevas columnas en serie las cargas térmicas para el condensador y re-hervidor se disminuyeron entre el 20% y 30% con respecto a las columnas existentes.

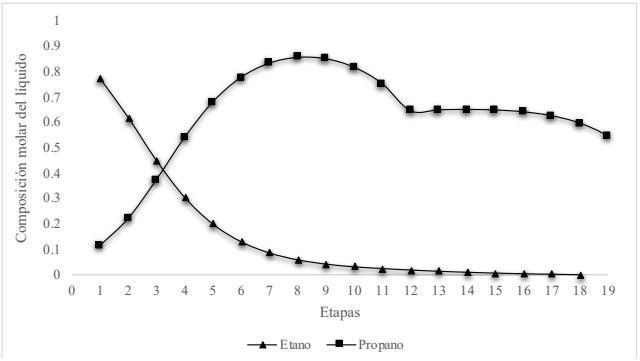


Figura 8. Perfiles de composición del líquido en la nueva desetanizadora.

En la desetanizadora existente y en la nueva, el componente clave intermedio (Propano) se remezcla, este es un comportamiento típico en una separación directa como la que se está aplicando en el sistema de separación y como se ha mencionado, esto implica que las cargas térmicas se incrementen y por ende también los costos operativos.

3.4 Configuración adicionando la TDWC

En la Figura 9 se presenta la simulación en estado estacionario del re-acondicionamiento para el fraccionamiento de GNL en un arreglo en paralelo adicionando al sistema ya existe, la TDWC. La capacidad de la planta se especificó 25% más sobre la capacidad existente, al igual que para las configuraciones en paralelo y en serie. Para simular el sistema de destilación térmicamente acoplado se emplea la configuración de la columna Petlyuk, debido a que el simulador UniSim Design carece aún del modelo para este tipo de sistemas; por lo que el sistema se compone de una absorbedora (prefraccionador) y la columna de destilación (columna principal), modelada con las ecuaciones MESH, método riguroso que resuelve los balances de materia, de energía, el equilibrio y las sumatorias.

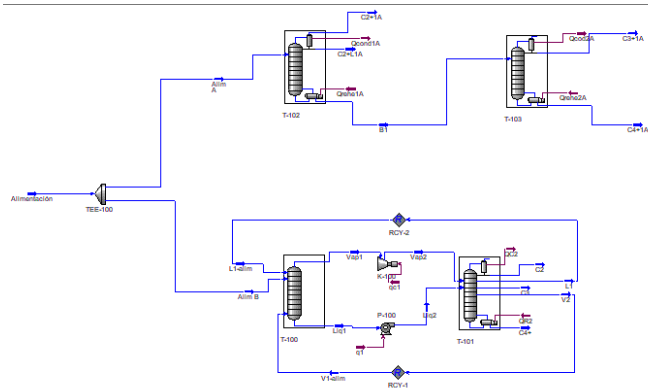


Figura 9. Esquema de destilación en paralelo incluyendo la TDWC.

Se obtuvieron purezas por encima de las especificadas, 97.87% mol para Etano y 93.52% mol para el Propano. La energía de separación utilizando la TDWC es menor comparada con el sistema convencional; se redujo un 50% y 25% para condensador y re-hervidor respectivamente.

ISSN: 2992-8338

4. CONCLUSIONES

Para la eliminación de los cuellos de botella presentados en las columnas, provocados por el incremento en la capacidad de separación se han propuesto 3 configuraciones y en una de ellas se utiliza la TDWC. Las configuraciones analizadas incluyeron arreglos en paralelo y en serie, entre las que se emplean nuevas columnas convencionales, la re-organización compleja de la secuencia de columnas existentes, la adaptación de las condiciones actuales de la columna a una TDWC y finalmente como un proyecto de re-ingeniería, la sustitución del sistema de destilación actual por la TDWC. Para encontrar las soluciones óptimas del re-acondicionamiento se consideró una serie de factores como las condiciones de operación, el material de construcción, la vida útil de los equipos, las propiedades termodinámicas de los componentes, la viabilidad de la separación, el número de platos teóricos entre otros. Con base en los resultados, el problema de cuellos de botella en columnas de destilación convencionales se disminuye o se elimina con la integración de la TDWC en el fraccionamiento de GNL para obtener Etano y Propano puros, cuando se incrementa la capacidad de un sistema de destilación existente. El uso de sistemas de destilación intensificados ahorran espacios en los equipos, disminuyen el consumo energético y los costos haciendo que la destilación sea sostenible.

REFERENCES

Amminudin, K. A. y Smith, R. (2001). Design and optimization of fully thermally coupled distillation columns. Part 2: Application of Dividing Wall Columns in retrofit. *Trans IChemE.*, 79 Part. A, 716–724.

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

Dejanović, I., Matijašević, Lj., Olujić, Ž., (2010). Dividing wall column—A breakthrough towards sustainable distilling. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification,* 49, 559–580. https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.04.001

Long, N.V.D., Minh, L.Q., Pham, T.N., Bahadori, A., Lee, M., (2016). Novel retrofit designs using a modified coordinate descent methodology for improving energy efficiency of natural gas liquid fractionation process. *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* 33, 458–468. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.05.038

Long, N.V.D., Lee, M., (2015). A hybrid technology combining heat pump and thermally coupled distillation sequence for retrofit and debottlenecking. *Energy*, 81, 103–110. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.05

Long, N.V.D., Lee, M., (2014). Review of Retrofitting Distillation Columns Using Thermally Coupled Distillation Sequences and Dividing Wall Columns to Improve Energy Efficiency. *J. Chem. Eng. Japan / JCEJ*, 47, 87–108. https://doi.org/10.1252/jcej.13we067

Long, N.V.D., Lee, M., (2012). Improvement of the Deethanizing and Depropanizing Fractionation Steps in NGL Recovery Process Using Dividing Wall Column. *J. Chem. Eng. Japan /JCEJ*, 45, 285–294. https://doi.org/10.1252/jcej.11we187

Minh, L.Q., Van Duc Long, N., Lee, M., (2012). Energy efficiency improvement of dimethyl ether purification process by utilizing dividing wall columns. *Korean J. Chem. Eng.* 29, 1500–1507. https://doi.org/10.1007/s11814-012-0048-6

Rewatkar, M. y Patil, R. C. (2022). Debottlenecking of an extractive distillation column for aromatics recovery: Effect of feed pre-vaporization. *Hydrocarbon Processing*, 1, 35–38.

Triantafyllou, C. y Smith, R. (1992). The design and optimization of fully thermally coupled distillation columns, *Chem. Eng. Res. Des.*, 70, 118–132

Van Duc Long, N., Lee, M., (2013a). Optimal retrofit of a side stream column to a dividing wall column for energy efficiency maximization. *Chemical Engineering Research and Design*, 91, 2291–2298. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.04.003

Van Duc Long, N., Lee, M., (2013b). Optimal retrofit design of extractive distillation to energy efficient thermally coupled distillation scheme. *AIChE Journal*, 59, 1175–1182. https://doi.org/10.1002/aic.13906

Van Duc Long, N., Lee, M., (2013c). Debottlenecking the Retrofitted Thermally Coupled Distillation Sequence. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52, 12635–12645. https://doi.org/10.1021/ie401140v

Van Duc Long, N., y Lee, M. (2011). Improved energy efficiency in debottlenecking using a fully thermally coupled distillation column. *Asia-Pacific J Chem Eng*, 6, 338–348. https://doi.org/10.1002/apj.577

Van Duc Long, N., Lee, S., Lee, M. (2010). Design and optimization of a dividing wall column for debottlenecking of the acetic acid purification process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49, 825–835. https://doi.org/10.1016/j.cep.2010.06.008

ISSN: 2992-8338

Systematic Literature Review: Measuring Poverty through Convolutional Neural Networks and Satellite Imagery

Williams Reyna Pérez * Fidelina Guadalupe Hernández Ramírez ** Vitervo López Caballero **

**Instituto Tecnológico de Chilpancingo, Av. José Francisco Ruiz Massieu No. 5, Col Villa Moderna, C.P. 39090 Chilpancingo de los Bravo, Gro (Tel: 747-141-6903; wreynaperez@gmail.com)*

***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos (e-mail: fidehernandez117@gmail.com; vitervo.lc@cenidet.tecnm.mx)*

Abstract. In Mexico, obtaining precise information on poverty levels faces significant limitations, primarily because these data are collected through traditional door-to-door surveys, which are time-consuming and costly. This situation not only hinders the effective implementation of social programs but also complicates the equitable allocation of resources. This article aims not only to highlight this challenge but also to offer various strategies to provide a solution. To address this issue, a thorough systematic literature review was conducted, following the Beretron protocol, which consists of three phases: planning, execution, and reporting. This review explored a range of innovative approaches to measuring poverty. The analysis revealed three promising strategies: the use of Convolutional Neural Networks in conjunction with satellite imagery, the application of Machine Learning techniques as predictive models, and a hybrid combination of both approaches. After selecting 100 studies from various scientific databases, 70 were shortlisted as candidates, from which 21 were filtered as the most relevant to the context of our research. The findings suggest that these studies represent a promising alternative to traditional methods of collecting economic activity data. They not only offer a more efficient and accurate way to measure poverty but also open new possibilities for a more equitable distribution of resources in the country.

Keywords: *Poverty Measurement, Satellite Imagery, Convolutional Neural Networks, Machine Learning, Systematic Literature Review*.

1. INTRODUCCIÓN

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible destaca el primer objetivo: poner fin a la pobreza, subrayando la importancia continua de monitorear su progreso. Las raíces de la pobreza, que incluyen el desempleo, la exclusión social y la vulnerabilidad ante desastres y enfermedades, persisten como obstáculos para la productividad de ciertas poblaciones (CONEVAL, n.d.).

Actualmente, la medición de la pobreza se realiza principalmente a través de encuestas puerta a puerta, un método que, aunque tradicional, presenta notables limitaciones debido a su alto costo y complejidad. Esto dificulta la obtención de datos precisos y confiables sobre los niveles de pobreza y las condiciones económicas de vida en México. Evaluar la pobreza es crucial para comprender la situación socioeconómica del país y diseñar programas sociales efectivos para combatirla. Por tanto, el objetivo de este artículo es llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura sobre diversas estrategias para medir la pobreza. El propósito es ofrecer una solución innovadora para obtener información más precisa y confiable.

2. MÉTODO

Para llevar un enfoque estructurado en la revisión de estudios que exploran diversas estrategias para la obtención de datos precisos y confiables sobre los niveles de pobreza, se emplea el protocolo que se muestra en la Figura 1, basado en la propuesta de Beretron (Brereton et al., 2007). Este protocolo se divide en tres fases fundamentales: planear la revisión, ejecutar la revisión y reportar la revisión. En la fase de la planeación, se describe el problema de investigación y se formulan las preguntas de investigación. En la fase de ejecución, se seleccionan las fuentes de información y se seleccionan los estudios primarios siguiendo cadenas de búsqueda establecidas, además de establecer criterios claros de inclusión y exclusión. En esta etapa, también se crea un formulario de extracción de datos para recopilar información relevante de los estudios seleccionados. Finalmente, en la fase de reporte, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de cada estudio primario seleccionado, abordando las preguntas de investigación planteadas en la fase de planificación. Este proceso metodológico garantiza una revisión sistemática y

ISSN: 2992-8338

rigurosa de la literatura, proporcionando una base sólida para las conclusiones y recomendaciones.

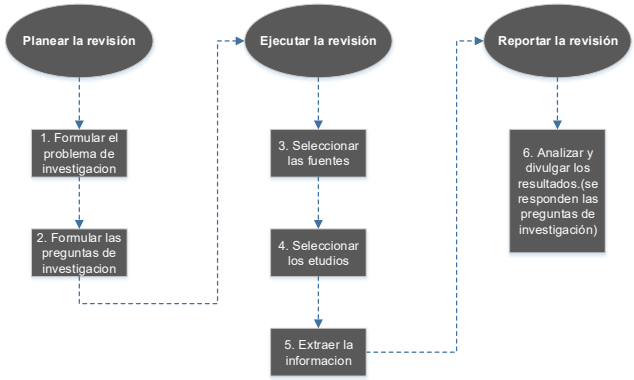


Figura 1. Proceso de la Revisión Sistemática de la Literatura.

3. RESULTADOS

A continuación, se describen los hallazgos obtenidos en cada fase del método empleado para realizar el estudio de trabajos relacionados al contexto del uso de estrategias para la obtención de información de actividad económica para la medición de la pobreza.

3.1 Planear la revisión

a) Formular el problema de la investigación

El desafío económico de medir la pobreza en México se enmarca en una compleja red de factores. Desde su vasta diversidad geográfica y demográfica hasta la necesidad de mantener una infraestructura robusta para recolectar y analizar datos, cada aspecto contribuye al elevado costo y la complejidad metodológica de esta tarea. Además, la constante actualización y seguimiento de indicadores añade otra capa de dificultad, generando un desafío económico significativo que puede obstaculizar la eficiencia en la asignación de recursos hacia áreas prioritarias. En este trabajo, exploramos una gama de estudios que se adentran en estrategias específicas para abordar el complejo proceso de recolección y análisis de datos. Nuestro objetivo es brindar un apoyo sólido a la medición de la pobreza, destacando cómo estas investigaciones pueden ofrecer soluciones innovadoras frente a un desafío tan crucial para el desarrollo del país.

b) Formular las preguntas de investigación

Las preguntas planteadas en la investigación en base al problema descrito son las siguientes:

Q1. ¿Cuáles son los enfoques detectados en los trabajos seleccionados para la medición de la pobreza?
Q2. ¿Cuáles son los atributos utilizados en los trabajos seleccionados para detectar actividad económica?

3.2 Ejecutar la revisión

a) Selección de fuentes de información

Para realizar la búsqueda de trabajos relacionados a la pregunta de investigación, se seleccionaron 3 bases de datos científicas las cuales son: IEEExplorer, ScienceDirect y los repositorios DBLP. Se utilizan 3 cadenas de búsqueda las cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Cadenas de búsqueda

Cadena	Descripción general de la cadena
A	Machine Learning and poverty measurement
B	Deep Learning and poverty measurement
C	Satellite Images and poverty measurement

b) Seleccionar los estudios

Como se observa en la Tabla 2, en este trabajo se recolecta un total de 100 artículos a partir del análisis de su título. De los 100 trabajos seleccionados, se analiza el título, resumen y palabras clave para filtrar 70 artículos candidatos. Posteriormente, de los 70 artículos candidatos se analiza su título, resumen, introducción y las conclusiones para obtener como resultado 21 artículos, que tratan de responder a la pregunta de investigación Q1 y Q2 planteadas en la sección 3.1.

Tabla 2. Selección de trabajos relacionados

Base de datos	Cadena de búsqueda	Estudios encontrados	Estudios candidatos	Estudios seleccionados
ScienceDirect	A, B, C	40	24	3
IEEE Explore	A, B, C	50	37	9
DBLP	A, B, C	10	9	9
TOTAL		**100**	**70**	**21**

Los criterios de inclusión y exclusión utilizados fueron los que se describen a continuación:

Inclusión

- Se seleccionan sólo los artículos que fueron publicados en el periodo 2020-2024.
- Se seleccionan artículos que tratan el contexto de relevancia de prevención de la pobreza.

Exclusión

- Los artículos en idiomas diferentes al inglés.
- Tesis
- Informes para propósitos de titulación.
- Libros
- Páginas Web.

c) Extraer la información

Para extraer la información de los estudios seleccionados se utiliza el formulario de extracción de información mostrado en

ISSN: 2992-8338

el siguiente link https://drive.google.com/file/d/1Xpa74OplPGxyxAPAqMiDLGWuQk084l6X/view?usp=sharing

3.3 Reportar la revisión

a) Analizar y divulgar los resultados

De los 21 estudios seleccionados, se detectan 3 enfoques (Figura 3) que responden a la pregunta de investigación Q1 la cual se describe en la sección 3.1. Cada uno de estos enfoques se seleccionan con base en el análisis de cada uno de estos trabajos. El enfoque A llamado "Redes Neuronales Convolucionales con Imágenes Satelitales" se derivó de la cadena de busqueda B en combinación con la cadena C. El enfoque B llamado "Machine Learning como modelos predictivos" se derivó de la cadena de búsqueda A. Y el enfoque C llamado "Enfoque híbrido Redes Neuronales Convolucionales y Machine Learning" se derivó de la combinación de las tres cadenas de búsqueda.

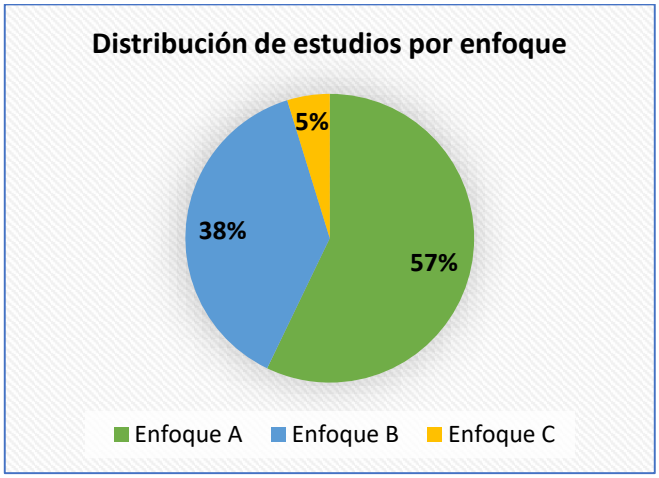


Figura 3. Distribución de estudios agrupados por enfoque.

Se detecta que hay un gran número de investigaciones que se inclinan por dar solución al problema sobre la obtención de datos confiables y precisos para predecir la pobreza. Sin embargo, en México no existe un estudio aún sobre las predicciones de la pobreza a través de Redes Neuronales Convolucionales e Imágenes Satelitales y a partir de esto, se busca la implementación de un modelo predictivo, el cual corresponde con el enfoque A. También se detecta el uso de Machine Learning como modelos predictivos y, por lo tanto, surgen nuevas investigaciones clasificándose en el segundo enfoque identificado en este artículo como el Enfoque B. A partir de los enfoques A y B, se identificó que los trabajos revisados abordan el contexto de uso de Redes Neuronales Convolucionales y Machine Learning en combinación de Imágenes Satelitales para ayudar a predecir la pobreza, lo cual se denomina como el Enfoque C.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada artículo agrupado por enfoque.

Enfoque A: Redes Neuronales Convolucionales con Imágenes Satelitales.

El problema que abordan los trabajos clasificados en este enfoque consiste en la dificultad para obtener información precisa sobre los niveles de pobreza, especialmente en naciones subdesarrolladas. La falta de datos precisos en estas áreas representa un obstáculo importante para la implementación efectiva de medidas destinadas a reducir la pobreza y distribuir equitativamente los recursos.

Una forma de solventar dicho problema consiste en el uso de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) e Imágenes satelitales. A continuación, se describen una serie de artículos clasificados en este enfoque.

En (Raghu Raman et al., 2023), los autores sugieren la implementación de un método único basado en la utilización de imágenes satelitales combinado con CNN, el cual extrae sus características y con base a los atributos identificados como el tipo de tejado, las fuentes de iluminación, la cercanía a las fuentes de agua, las áreas agrícolas y las áreas industriales. Se valida dicho modelo verificando la exactitud, precisión, recuperación y puntuación F1 del modelo entrenado utilizando las medidas de evaluación relevantes.

En (Chitturi & Nabulsi, 2021) los autores proponen el uso de imágenes satelitales aéreas combinado con Redes Neuronales Profundas para estimar el nivel de pobreza de una región. La DNN experimenta con imágenes diurnas y nocturnas y se analiza el impacto de la cantidad y la calidad de los datos en la precisión de las redes neuronales llegando a la conclusión de que no son necesarios tener muchos datos para una mayor precisión, por último, se evalúa las DNN realizando experimentos en tres diferentes continentes.

En (Ni et al., 2020) , los autores proponen cuatro enfoques de aprendizaje profundo, como VGG-Net, Inception-Net, ResNet y DenseNet, para extraer características y aplicar regresión LASSO en la predicción de la pobreza. Además, se integran el módulo SE (módulo de compresión y excitación) y la pérdida focal para mejorar el rendimiento, concluyendo que DenseNet con estas adiciones tiene el mejor desempeño según los resultados experimentales.

En (Marathe, 2023),los autores proponen una encuesta que ofrece un estudio sistemático que ayuda a comprender y evaluar los sistemas existentes que predicen los niveles de pobreza a partir de imágenes capturadas mediante satélites.
Se valida el modelo utilizando conjuntos de datos separados y se evalúa su capacidad para predecir los niveles de pobreza con precisión.

En (Danbirni, 2020), los autores proponen el uso de técnicas de redes neuronales convolucionales e imágenes de satélite como un medio rápido, de bajo costo y escalable para predecir la pobreza. Los autores no validan su propuesta. Los resultados sugieren que el enfoque basado en CNN tiene un gran potencial para mejorar la predicción de la pobreza.

ISSN: 2992-8338

En(Alexander et al., 2023), los autores proponen el uso de técnicas de teledetección, como redes neuronales convolucionales, para medir los niveles de pobreza utilizando imágenes satelitales. Estas técnicas pueden prever la intensidad de las luces nocturnas y así determinar la pobreza en una zona. Los autores validan su propuesta realizando pruebas del modelo seleccionado, las cuales salieron con resultados del 95,1%, 97,1%, 98,1% y 96,5%. Lo que indica que es una propuesta viable.

En (Hoogstra et al., 2024), los autores proponen implementar un modelo de conjunto que combina predicciones de imágenes diurnas y nocturnas con factores económicos y demográficos para abordar la predicción de la pobreza mediante la combinación de datos de diversas fuentes, como imágenes satelitales y datos tradicionales gubernamentales. Se valida la propuesta mediante un enfoque riguroso que involucra la revisión de literatura, la utilización de datos diversos, el desarrollo de un modelo específico y la evaluación detallada de variables relevantes, lo que respalda la fiabilidad y relevancia de los resultados obtenidos.

En (Sohnesen et al., 2022), los autores proponen el uso de datos de encuestas de hogares combinados con redes neuronales convolucionales aplicadas a imágenes satelitales de alta resolución.

Estos datos y tecnologías pueden utilizarse para generar mapas detallados a nivel de vecindario, proporcionando información valiosa para programas efectivos de reducción de la pobreza.
validan su propuesta a través de un caso de estudio específico donde se utilizó el desarrollar un programa red de seguridad social urbana, cómo metodología puede tener un impacto directo en el desarrollo de políticas y programas sociales destinados a abordar la pobreza urbana de manera más efectiva.

En (Thejas et al., 2021), los autores proponen el uso de imágenes satelitales de calidad, en combinación con CNN. El algoritmo analiza tres parámetros específicos; tipo de techo, nivel de iluminación y fuentes cercanas de agua. Validan su propuesta observando que los resultados arrojaron una precisión de alrededor del 99 % y un error de 0,77 en todos los conjuntos de datos.

En(Yue et al., 2021), los autores proponen un enfoque alternativo analizando imágenes diurnas por medio de un modelo de aprendizaje profundo para medir explícitamente la calidad de la vivienda. Validan su propuesta utilizando métodos estándar de evaluación de programas como ensayos controlados aleatorios y encuestas de hogares, para medir la calidad de la vivienda a través del entrenamiento y prueba de un modelo específico.

En (Sheng et al., 2021), los autores diseñan un procedimiento basado en datos para capturar la relevancia entre la pobreza y los datos relacionados, proponiendo un modelo multicanal neuronal profundo para codificar características de múltiples tipos, denominado Pronóstico de Pobreza Profunda. Validan su propuesta realizando extensos experimentos en cinco conjuntos de datos de ciudades y los resultados obtenidos muestran que el marco propuesto ha logrado muchos beneficios con respecto a los métodos anteriores.

En (Sarmadi et al., 2023), los autores proponen un modelo CNN, entrenado con imágenes satelitales diurnas y nocturnas de resolución relativamente baja, analizando atributos como carreteras y edificios. Validan su propuesta realizando múltiples experimentos de explicabilidad realizados en el modelo, señalando la importancia de los tamaños de los objetos, los colores de los píxeles en la imagen y proporcionan una visualización de la importancia de diferentes estructuras en las imágenes de entrada. También se proporciona una visualización de imágenes que maximizan la predicción de la red del índice de riqueza, lo que proporciona pistas sobre en qué se basa la predicción del modelo.

Enfoque B: Machine Learning como modelos predictivos

El problema que abordan los trabajos clasificados en este enfoque es el mismo que aborda el enfoque A. Sin embargo, los métodos de predicción son diferentes. Para solucionarlo, se plantea el uso de modelos clásicos de Machine Learning en combinación con datos de diferentes fuentes como bases de datos de encuestas e información gubernamental para solventar dicha problemática.

En (Arceo-Gomez et al., 2022) los autores proponen realizar un estudio estadístico de todas las personas que acudieron al IMSS a realizarse la prueba del COVID-19 en el periodo de marzo y noviembre de 2020 para demostrar si la asociación de la probabilidad de morir con los percentiles de ingresos, utilizando una estimación probit y ajustando por diagnóstico de COVID-19, variables sociodemográficas y comorbilidades. Validan su propuesta realizando una prueba donde se utiliza el SSN (numero de seguridad social), y vinculan los registros de salud de los pacientes evaluados con los datos de los trabajadores registrados en el IMSS y sus salarios.
Solo se utilizaron datos de personas empleadas entre junio 2019 y noviembre de 2020.
Reevaluaron un total de 412,551 trabajadores para así poder determinar la tasa de mortalidad y el nivel socioeconómico al cual pertenecen. Dando como resultado que las personas mas pobres tienen cuatro veces mas probabilidad de ser hospitalizadas, y que tienen cinco veces mas probabilidad de morir que aquellas que tienen mayores ingresos

En (Zixi, 2021), propone varios modelos de aprendizaje automático para esta tarea, pero ninguno abarca todos los factores relevantes. Se sugiere la necesidad de un enfoque integrado que combine datos de diferentes fuentes, como el Índice de Probabilidad de Pobreza y la Iniciativa de Pobreza y Desarrollo Humano de Oxford. Se evalúan modelos como regresión lineal, árboles de decisión, bosques aleatorios, impulso gradual y redes neuronales, utilizando validación cruzada y búsqueda de cuadrícula para mejorar la precisión.
Concluyendo que el modelo de aumento del gradiente es el más preciso, y se destaca al nivel educativo como el factor más importante en la predicción de la pobreza.

ISSN: 2992-8338

En (Mashhood et al., 2023), los autores proponen el uso del algoritmo LightGBM para inferir etapas de pobreza basándose en variables del hogar. La versión LightGBM empleada en el estudio demostró una alta eficiencia en el conjunto de validación, afirmando su efectividad en la proyección de condiciones de pobreza. Estos hallazgos pueden proporcionar información a políticas destinadas a aliviar la pobreza y elevar el bienestar social. El trabajo proporciona la base para futuras investigaciones sobre la predicción de la pobreza y afirma el potencial de las metodologías de aprendizaje automático para abordar complejos desafíos sociales.

En (Garza-Rodriguez et al., 2021), se propone la utilización de datos de la ENIGH de 2018 y aplicar modelos estadísticos como probit y regresión cuantil para analizar cómo los determinantes de la pobreza varían dependiendo el nivel de pobreza. Los resultados nos arrojan que hogares con más miembros, jefes mujeres o que hablan una lengua indígena tienen mayores probabilidades de ser pobres. También se observa que el nivel educativo elevado contribuye a aumentar los ingresos en todos los niveles de pobreza.

En (Lustig et al., 2021), los autores proponen un método de microsimulación para medir el impacto causado por la pandemia. La validación de su propuesta se hace mediante la comparación de los resultados obtenidos y los datos de las instituciones CEPAL Y CONEVAL. Los resultados arrojan diferencias significativas entre áreas urbanas y rurales, además, se señala que la población indígena, que generalmente se encuentra en áreas rurales, podría experimentar un aumento menor de la pobreza en comparación con la población no indígena.

En (Alsharkawi et al., 2022), los autores proponen un enfoque no tradicional para la predicción precisa de la pobreza en los hogares jordanos mediante el algoritmo LightGBM por medio de la selección de características y el aprendizaje automático. Se emplea el algoritmo y se valida su propuesta a través de la comparación de los resultados con un estudio previo y resaltando la eficiencia y la capacidad de adaptación del modelo mejorado en el contexto de las necesidades actuales de evaluación de la pobreza.

En (Lin Htet et al., 2021), los autores proponen la implementación de Machine Learning en la estimación de pobreza a través de datos de entrada de fuentes abiertas ampliamente disponibles y accesibles, incluidas las luces nocturnas y los datos de OpenStreetMap. Demostraron que los modelos de aprendizaje automático pueden explicar mejor la pobreza cuando las características de entrada de múltiples datos se integran juntas en lugar de utilizarlas de una sola fuente de datos. Validan el uso de 5 modelos diferentes de aprendizaje automático y seleccionan la regresión de aumento de gradiente como modelo final en el caso de Myanmar.

En (Al Kez et al., 2024) ,proponen predecir la pobreza a través de la medición de pobreza energética, utilizando un método de árbol aleatorio combinado con imágenes satelitales. Validan su propuesta a través de técnicas como validación cruzada, análisis de sensibilidad y pruebas estadísticas para evaluar la precisión y robustez del modelo de aprendizaje automático. Concluyendo que las imágenes satelitales pueden ayudar a predecir más del 83 % de la pobreza energética.

Enfoque C: Enfoque híbrido Redes Neuronales Convolucionales y Machine Learning.

Este enfoque al igual que los anteriores aborda la misma problemática, pero la diferencia es la combinación de tecnologías de Aprendizaje Automático con Aprendizaje Profundo. En (Hall et al., 2023),los autores proponen una revisión de la literatura de las predicciones de bienestar y pobreza en el campo de Machine Learning y Deep Learning e imágenes satelitales. Validan su propuesta aplicando un método de revisión integradora para extraer datos clave sobre factores relacionados con la pobreza. Los resultados destacaron la importancia del preprocesamiento, la cantidad de datos, el tipo de indicador de bienestar y la elección del modelo de inteligencia artificial. La combinación de aprendizaje automático y profundo mejora significativamente la capacidad predictiva hasta en un 15%.

4. DISCUSIÓN

La revisión sistemática de la literatura revela que el empleo de tecnologías como el Machine Learning, Deep Learning e imágenes satelitales ofrece una prometedora alternativa para medir la pobreza en México, superando las limitaciones de las encuestas tradicionales. Esta revisión describe una metodología para la búsqueda de trabajos relacionados con el contexto de la medición de la pobreza, y como resultado de esta búsqueda sistemática se concluye lo siguiente: En respuesta a la pregunta de investigación Q1, se recopilaron un total de 21 estudios, de los cuales 9 fueron encontrados en la base de datos IEEExplorer, 9 en la base de datos DBLP y 3 en la base de datos ScienceDirect. Se identificaron 3 enfoques importantes: Redes Neuronales Convolucionales con Imágenes Satelitales, Machine Learning como modelos predictivos y un enfoque híbrido de Redes Neuronales Convolucionales y Machine Learning. Para responder a la pregunta de investigación Q2, se detectaron varios atributos que fueron recolectados mediante un formulario de extracción, como tipo de techos, iluminación, índice de vegetación, fuentes cercanas de agua, zonas industriales cercanas, superficie del piso, antigüedad de la vivienda, piscinas, edad, sexo, ingreso total del hogar y gasto total del hogar. Estas características fueron consideradas las más importantes. Se concluye que el uso de tecnologías como el Machine Learning, Deep Learning e imágenes satelitales ofrece una alternativa prometedora para medir la pobreza, superando las limitaciones de las encuestas tradicionales.

REFERENCIAS

Al Kez, D., Foley, A., Abdul, Z. K., & Del Rio, D. F. (2024). Energy poverty prediction in the United Kingdom: A machine learning approach. *Energy Policy*, *184*, 113909. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2023.113909.

Alexander, A., M, A., E, D., & Salih, M. (2023). Predicting Poverty Level From Satellite Imagery Using Ensemble Learning. *International Journal of Scientific Research in*

ISSN: 2992-8338

Science, Engineering and Technology, *10*(3), 626–633. https://doi.org/10.32628/IJSRSET23103175.

Alsharkawi, A., Al-Fetyani, M., Dawas, M., Saadeh, H., & Alyaman, M. (2022). Improved Poverty Tracking and Targeting in Jordan Using Feature Selection and Machine Learning. *IEEE Access*, *10*, 86483–86497. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3198951.

Arceo-Gomez, E. O., Campos-Vazquez, R. M., Esquivel, G., Alcaraz, E., Martinez, L. A., & Lopez, N. G. (2022). The income gradient in COVID-19 mortality and hospitalisation: An observational study with social security administrative records in Mexico. *The Lancet Regional Health - Americas*, *6*, 100115. https://doi.org/10.1016/J.LANA.2021.100115.

Brereton, P., Kitchenham, B. A., Budgen, D., Turner, M., & Khalil, M. (2007). Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, *80*(4), 571–583. https://doi.org/10.1016/J.JSS.2006.07.009.

Chitturi, V., & Nabulsi, Z. (2021). *Predicting Poverty Level from Satellite Imagery using Deep Neural Networks*. https://arxiv.org/abs/2112.00011v1.

CONEVAL. (n.d.). *La medición multidimensional de la pobreza en México*.

Danbirni, M. I. (2020). Poverty Prediction of Nigeria by using Convolutional Neural Network with Combination of Satellite Image. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, *8*(11), 790–795. https://doi.org/10.22214/IJRASET.2020.32280

Garza-Rodriguez, J., Ayala-Diaz, G. A., Coronado-Saucedo, G. G., Garza-Garza, E. G., Ovando-Martinez, O., & Lopez-Menendez, J. (2021). *Determinants of Poverty in Mexico: A Quantile Regression Analysis*. https://doi.org/10.3390/economies9020060

Hall, O., Dompae, F., Wahab, I., & Dzanku, F. M. (2023). A review of machine learning and satellite imagery for poverty prediction: Implications for development research and applications. *Journal of International Development*, *35*(7), 1753–1768. https://doi.org/10.1002/JID.3751

Hoogstra, B., Velichety, S., & Zhang, C. (2024). Developing a contextual model of poverty prediction using data science and analytics – The case of Shelby County. *Decision Support Systems*, *177*, 114080. https://doi.org/10.1016/J.DSS.2023.114080

Lin Htet, N., Kongprawechnon, W., Thajchayapong, S., & Isshiki, T. (2021). Machine learning approach with multiple open-source data for mapping and prediction of poverty in Myanmar. *ECTI-CON 2021 - 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology: Smart Electrical System and Technology, Proceedings*, 1041–1045. https://doi.org/10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454768

Lustig, N., Martínez Pabón, V., Lustig, N., & Martínez Pabón, V. (2021). The impact of COVID-19 on inequality and poverty in Mexico. *Estudios Económicos (México, D.F.)*, *36*(1), 7–25. https://doi.org/10.24201/EE.V36I1.416

Marathe, V. (2023). Exploring Techniques for Poverty Level Prediction from Satellite Imagery. *INTERANTIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, *07*(08). https://doi.org/10.55041/ijsrem25131

Mashhood, A., Abideen, Z. U., Arshad, U., Ali, R. H., Khan, A. A., & Khan, B. (2023). Innovative Poverty Estimation through Machine Learning Approaches. *18th IEEE International Conference on Emerging Technologies, ICET 2023*, 154–158. https://doi.org/10.1109/ICET59753.2023.10374795

Ni, Y., Li, X., Ye, Y., Li, Y., Li, C., & Chu, D. (2020). An Investigation on Deep Learning Approaches to Combining Nighttime and Daytime Satellite Imagery for Poverty Prediction. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, *18*(9), 1545–1549. https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3006019

Raghu Raman, D., Vidhya, S., & Mothishwara Navinkumar, N. (2023). Satellite Imagery-based Prediction of Poverty using Faster R-CNN. *Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, ICICCS 2023*, 41–46. https://doi.org/10.1109/ICICCS56967.2023.10142570

Sarmadi, H., Rognvaldsson, T., Carlsson, N. R., Ohlsson, M., Wahab, I., & Hall, O. (2023). Towards Explaining Satellite Based Poverty Predictions with Convolutional Neural Networks. *2023 IEEE 10th International Conference on Data Science and Advanced Analytics, DSAA 2023 - Proceedings*. https://doi.org/10.1109/DSAA60987.2023.10302541

Sheng, B., Chen, S., Si, H., Zhu, Y., Bai, Z., & Li, S. (2021). A feature-based deep neural framework for poverty prediction. *Proceedings - 2021 2nd International Conference on Computing and Data Science, CDS 2021*, 568–573. https://doi.org/10.1109/CDS52072.2021.00103

Sohnesen, T. P., Fisker, P., & Malmgren-Hansen, D. (2022). Using Satellite Data to Guide Urban Poverty Reduction. *Review of Income and Wealth*, *68*(S2), 282–294. https://doi.org/10.1111/ROIW.12552

Thejas, B. U., Dhulkhed, S. S., Shetty, J., & Swamy, S. R. (2021). Poverty Detection using Satellite Imagery. *Proceedings of the 5th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud), I-SMAC 2021*, 1293–1298. https://doi.org/10.1109/I-SMAC52330.2021.9640823

Yue, L., Solomon, H., Hsiang, M., Gonzalez-Navarro, M., Miguel, W. T. E., Magruder, J., Faber, B., Burke, M., Blumenstock, J., Kaur, S., Ligon, E., Sadoulet, E., De Janvry, A., Mahajan, A., Huang, L. Y., & Hsiang, S. M. (2021). *Using Satellite Imagery and Deep Learning to Evaluate the Impact of Anti-Poverty Programs*. https://doi.org/10.3386/W29105

Zixi, H. (2021). Poverty Prediction through Machine Learning. *Proceedings - 2nd International Conference on E-Commerce and Internet Technology, ECIT 2021*, 314–324. https://doi.org/10.1109/ECIT52743.2021.00073

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Energy consumption of the thermal system of a pilot-scale photobioreactor based on the variation of the controller hysteresis.

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: This study examines the electrical consumption of the thermal system in a photobioreactor, focusing on the variation of the temperature reference hysteresis in the culture medium. The results reveal that the electrical consumption of the system maintains consistent behavior during day and night, with a higher number of activations during the day. These variations are associated with climatic conditions in regions with high thermal variability where photobioreactors are located. Increasing the temperature reference hysteresis results in a decrease in the number of activations of the thermal system, along with an increase in operating time. The reduction in activations has a more significant impact on electrical consumption, increasing the hysteresis can improve the overall efficiency of the photobioreactor.

Keywords: Photobioreactor, energy consumption, termal system, thermal control, controller hysteresis.

1.- INTRODUCCIÓN

En la búsqueda continua de soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, el estudio y la optimización de sistema de producción de energía juegan un papel muy importante. Uno de los desafíos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad es la reducción de las emisiones de gases de efeto invernadero y la mitigación del cambio climático (Gárate, 2021). La producción de energía es uno de los principales impulsores de estas emisiones, y es imperativo encontrar formas innovadoras y eficientes de reducir su impacto ambiental (Guevara, 2023).

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). El cultivo de microalgas en fotobiorreactores para aplicaciones energéticas se enfrenta a desafíos significativos que impiden una implementación a escala industrial debido a la baja rentabilidad energética (Tonia, 2022),

México, como ejemplo de un gran número de países tropicales cercanos al ecuador del planeta, presenta una temperatura muy variable debido a las altas variaciones que se registran entre primavera y verano (CONAGUA, 2021), siendo la temperatura esencial para el crecimiento microalgal es necesario un sistema de control térmico, el cual representa la mayor parte de la energía eléctrica consumida por el fotobiorreactor (Páez, 2023).

La histéresis es un parámetro importante en el control de sistemas térmicos, que determina el rango en el cual el sistema permanece activo o inactivo, su variación afecta el consumo energético del fotobiorreactor siendo de importancia para maximizar su eficiencia (Torzillo, 2021).

Desde el punto de vista energético, el sistema térmico representa el mayor consumo eléctrico en el fotobiorreactor, por lo que, el presente trabajo tiene como objetivo conocer el consumo eléctrico del sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor a escala piloto a través de la variación de la histéresis de la temperatura de referencia en el medio de cultivo con el fin de encontrar un área de oportunidad en la reducción de los encendidos del sistema térmico y por ende en la reducción de su consumo eléctrico.

1.1.- Descripción del sistema.

Se representa el diagrama general del sistema térmico de enfriamiento (STE) del fotobiorreactor (FBR) de estudio (figura 1) donde se identifican los diferentes subsistemas, como el sistema térmico de enfriamiento primario (STEP) y el sistema térmico de enfriamiento secundario (STES), cada uno de estos sistemas cuenta con sus respectivos actuadores (tabla 1), además de sus dispositivos mecánicos y auxiliares para su buen funcionamiento, como la válvula de expansión que se encarga de expandir el refrigerante R22 en el intercambiador de calor primario, extrayendo el calor del refrigerante glicol, un presostato como dispositivo de operación y de protección ante alguna perdida de refrigerante o simplemente para evitar el congelamiento en el intercambiador de calor primario, se cuenta con un intercambiador de calor secundario como recipiente del refrigerante glicol, donde ocurre un intercambio térmico del glicol refrigerado por el R22 y el glicol que está en reposo almacenado, y por ultimo un tercer intercambiador de calor sumergido en el medio de cultivo (MC) donde ocurre el intercambio térmico entre el refrigerante glicol y el medio de cultivo, extrayendo el calor que recibe el medio de cultivo del medio ambiente junto con otras perturbaciones como el sistema de iluminación. El refrigerante glicol extrae el calor del medio de cultivo, el refrigerante R22 extrae el calor del refrigerante glicol y lo disipa al medio ambiente.

ISSN: 2992-8338

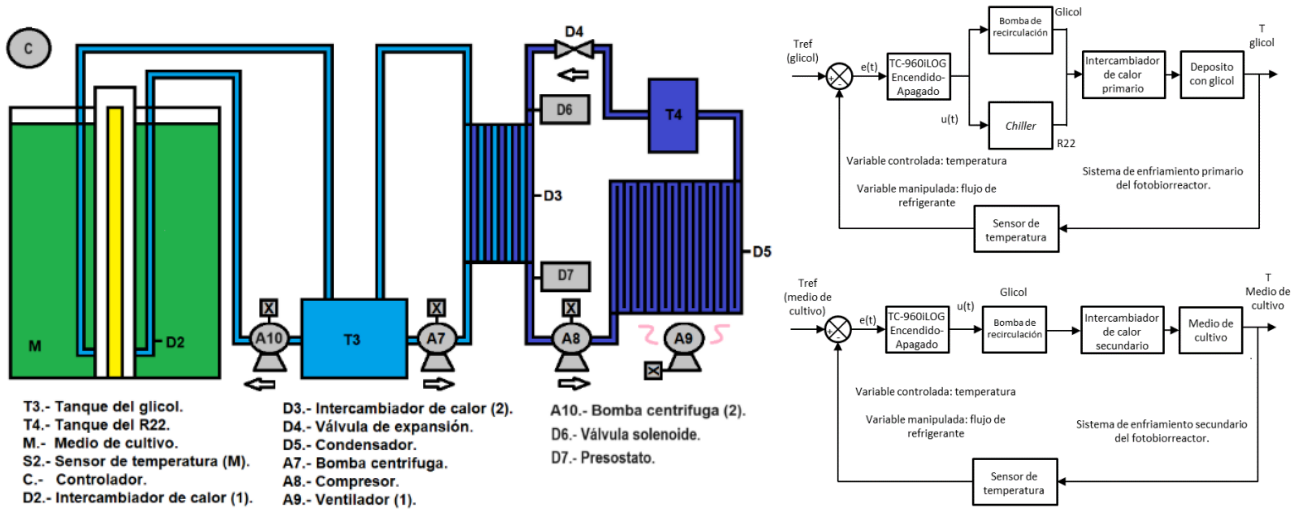


Figura 1.- Diagrama general del control del sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor de estudio.

Tabla 1.- Potencia nominal de los actuadores que conforman al sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor.

Sistema	Actuador	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia nominal (kW)
Sistema térmico de enfriamiento primario	*Chiller*	220	7.27	1.6
	Bomba 1	127	1	0.127
Sistema térmico de enfriamiento secundario	Bomba 2	127	1	0.127

El sistema de control térmico de enfriamiento del fotobiorreactor es esencial para mantener en el medio de cultivo (figura 2) la temperatura optima de la microalga, sin embargo, este cuenta con un controlador de encendido-apagado (figura 3) el cuál opera todos los actuadores y dispositivos mecánicos del sistema (figura 4), este tipo de controladores suelen ser eficaces en su función, pero ineficientes energéticamente.



Figura 2.- Medio de cultivo en el fotobiorreactor de estudio



Figura 3.- Controlador del sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor de estudio.

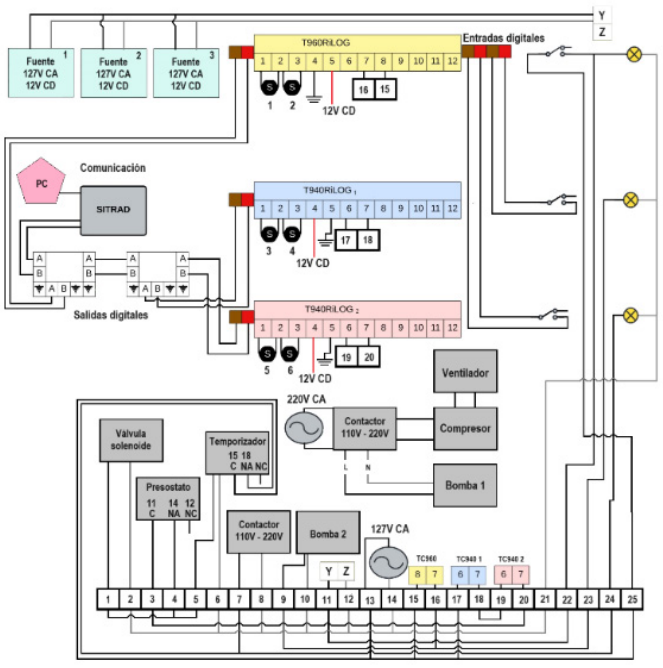


Figura 4.- Diagrama general del controlador del sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor de estudio

ISSN: 2992-8338

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 (Sukacova, 2021). El consumo eléctrico en el sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor, el cual es el sistema de interés por ser el sistema de mayor consumo eléctrico del fotobiorreactor, requiere de aplicar una metodología que permita conocer el consumo eléctrico en condiciones reales de operación, debido a que este depende de la temperatura ambiente (Robles, 2023), la cuál es variable en el tiempo. Consiste en tres pasos (figura 5), la identificación de los actuadores, la implementación de un sistema de monitoreo de potencia eléctrica y tiempos de operación, y la aplicación de las leyes de Watt y Joule.

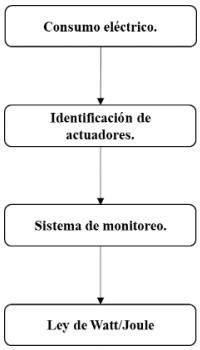


Figura 5.- Metodología para determinar el consumo eléctrico.

La potencia eléctrica se obtuvo a través de sensores de potencia certificados (figura 6). Los tiempos de operación, al igual que las potencias eléctricas fueron registrados por Arduino (figura 7). Ambos componentes forman el sistema de monitoreo y registro de datos (figura 8).



Figura 6.- PZEM004T.



Figura 7.- Arduino.

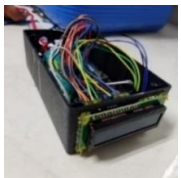


Figura 8.- Sistema de monitoreo y registro de datos.

En la evaluación del consumo eléctrico 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.

3.- EXPERIMENTACIÓN

Los tres experimentos realizados tienen una duración de un día con tres réplicas cada uno, dando un total de nueve días de experimentación, del 19/03/2024 a las 3PM siendo el día uno al 28/03/2024 a las 3 PM siendo el día nueve, variando la histéresis de la temperatura de referencia del medio de cultivo en el controlador de encendidos-apagados TC960iLOG.

El objetivo es obtener el consumo eléctrico del sistema térmico de enfriamiento primario (CESTEP) así como su medida de tendencia central y su medida de dispersión (CEMSTEP), obtener el consumo eléctrico del sistema térmico de enfriamiento secundario (CESTES) así como su medida de tendencia central y su medida de dispersión (CEMSTES), y por último, obtener el consumo eléctrico del sistema térmico de enfriamiento (CESTE) así como su medida de tendencia central y su medida de dispersión (CEMSTE).

Cada medición con sus respectivas réplicas de tres días y los respectivos cambios de histéresis de la temperatura de referencia del medio de cultivo con el fin de aplicar la estadística correspondiente y comprobar si existe alguna reducción del consumo eléctrico del sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor de estudio.

El experimento uno tiene una duración de tres días, del 19/03/2024 a las 3PM siendo el día uno al 22/03/2024 a las 3PM siendo el día tres, utilizando los parámetros estandarizados (tabla 2) con histéresis en la temperatura de referencia del medio de cultivo de 0.1 °C.

El experimento dos tiene una duración de tres días, del 22/03/2024 a las 3PM siendo el día uno al 25/03/2024 a las 3PM siendo el día tres, utilizando los parámetros estandarizados (tabla 2) con histéresis en la temperatura de referencia del medio de cultivo de 0.5 °C.

El experimento tres tiene una duración de tres días, del 25/03/2024 a las 3PM siendo el día uno al 28/03/2024 a las 3PM siendo el día tres, utilizando los parámetros estandarizados (tabla 2) con histéresis en la temperatura de referencia del medio de cultivo de 1 °C.

Tabla 2.- Parámetros del medio de cultivo y del sistema térmico de enfriamiento.

Variable	Valor
Temperatura	25 °C
Iluminación	104.5 lm W^{-1}
Aireación	60 L/min
pH	8.25-8.5 upH
Salinidad	35 ups
Temperaturas de referencia	**Valor**
Temperatura del R22	10 °C máximo
Temperatura baja del glicol	3 °C
Temperatura alta del glicol	10 °C
Temperatura de protección al congelamiento	15 °C
Histéresis de la temperatura de referencia del medio de cultivo	**Valor**
Experimento 1	0.1 °C
Experimento 2	0.5 °C
Experimento 3	1 °C

ISSN: 2992-8338

4.- RESULTADOS

Se implementó el sistema de monitoreo de consumo eléctrico (SMCE) en el sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor (figura 9).



Figura 9.- Implementación del SMCE en el STE del FBR.

El experimento con histéresis de 0.1°C (figura 10, figura 11) en la temperatura de referencia en el medio de cultivo tuvo un consumo eléctrico medio de 1334.71 VA s en el sistema térmico de enfriamiento primario y 64.13 VA s en el sistema térmico de enfriamiento secundario, teniendo un consumo eléctrico total de 1309.02 VA s ± 139.73 VA s en el sistema térmico general (figura 12, figura 13), se observa una diferencia significativa entre el día 1 y los días 2 y 3, lo que demuestra una medida de dispersión alta debido a las variaciones de la temperatura ambiente, la cuál es la principal perturbación del sistema térmico de enfriamiento y del fotobiorreactor. El experimento con histéresis de 0.5°C (figura 14, figura 15) en la temperatura de referencia en el medio de cultivo tuvo un consumo eléctrico medio de 856.51 VA s en el sistema térmico de enfriamiento primario y 86.25 VA s en el sistema térmico de enfriamiento secundario, teniendo un consumo eléctrico total de 942.76 VA s ± 280.81 VA s en el sistema térmico general, se observa un aumento en el consumo eléctrico del sistema térmico de enfriamiento secundario, lo que resulta despreciable, debido a la disminución del consumo eléctrico en el sistema térmico de enfriamiento secundario (figura 16, figura 17). El experimento con histéresis de 1°C (figura 18, figura 19) en la temperatura de referencia en el medio de cultivo tuvo un consumo eléctrico medio de 606.26 VA s en el sistema térmico de enfriamiento primario y 55.69 VA s en el sistema térmico de enfriamiento secundario, teniendo un consumo eléctrico total de 661.95 VA s ± 313.11 VA s en el sistema térmico general (figura 20, figura 22), se observa de nuevo una diferencia significativa entre el día 1 y los días 2 y 3, como ya es mencionado, debido a las variaciones de la temperatura ambiente, las cuales no son controlables.

Los resultados obtenidos (tabla 3) tienen medidas de dispersión significativas, sin embargo, conservan la medida de tendencia central del comportamiento del consumo eléctrico, el cual presenta un mayor número de encendidos durante las primeras y las últimas horas del experimento (día) y un menor número de encendidos en el centro (noche). Se observa que al aumentar la histéresis de la temperatura de referencia en el medio de cultivo se presenta una disminución en el número de encendidos y un aumento en la duración de estos.

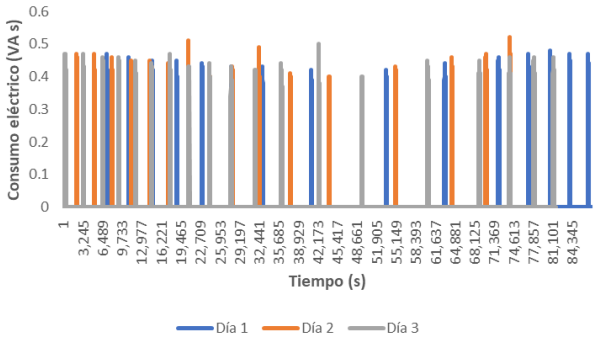


Figura 10.- CESTEP del FBR con histéresis 0.1°C en el MC, 19/03/2024/3PM - 22/03/2024/3PM.

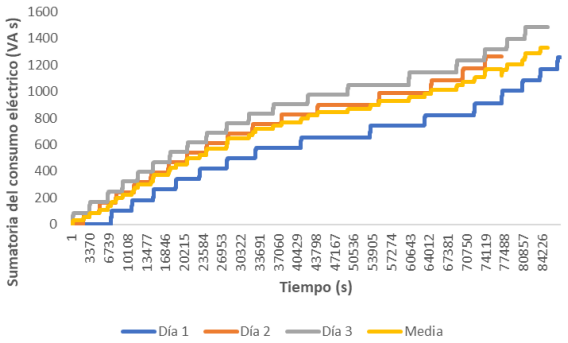


Figura 11.- Sumatoria del CESTEP del FBR con histéresis 0.1°C en el MC, 19/03/2024/3PM - 22/03/2024/3PM.

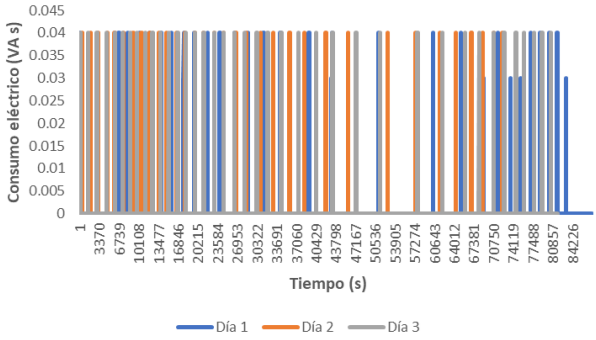


Figura 12.- CESTES del FBR con histéresis 0.1°C en el MC, 19/03/2024/3PM - 22/03/2024/3PM.

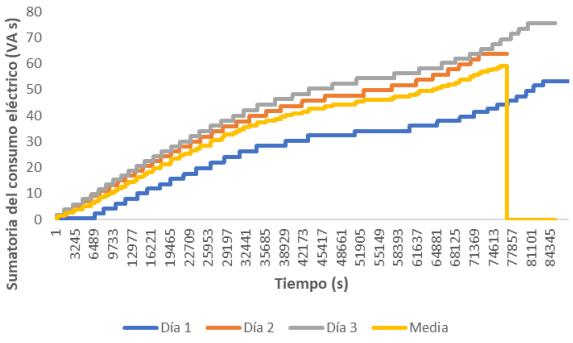


Figura 13.- Sumatoria del CESTES del FBR con histéresis 0.1°C en el MC, 19/03/2024/3PM - 22/03/2024/3PM.

ISSN: 2992-8338

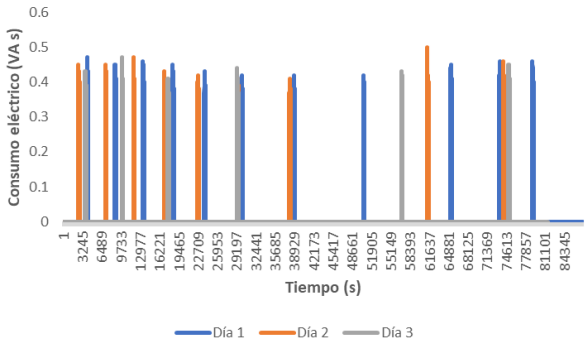


Figura 14.- CESTEP del FBR con histéresis 0.5°C en el MC, 22/03/2024/3PM - 25/03/2024/3PM.

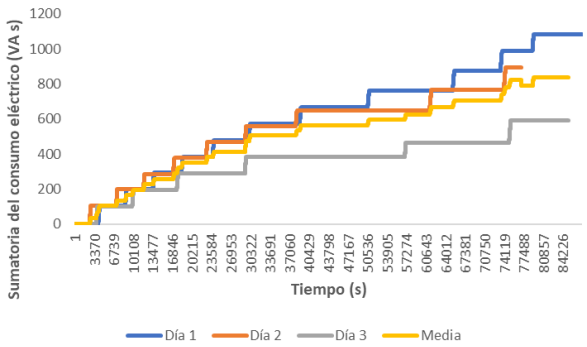


Figura 15.- Sumatoria del CESTEP del FBR con histéresis 0.5°C en el MC, 22/03/2024/3PM - 25/03/2024/3PM.

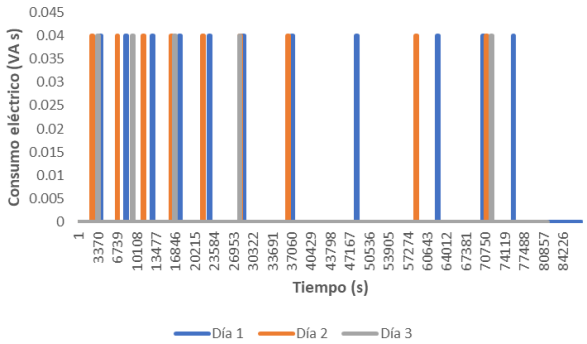


Figura 16.- CESTES del FBR con histéresis 0.5°C en el MC, 22/03/2024/3PM - 25/03/2024/3PM.

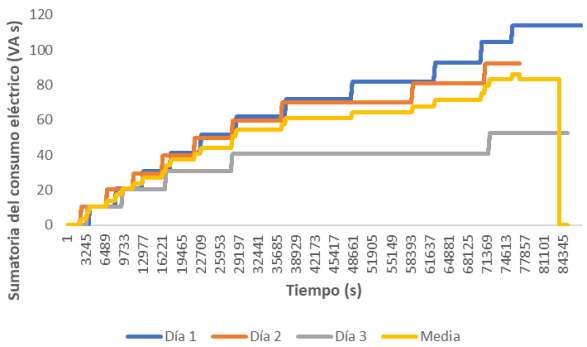


Figura 17.- Sumatoria del CESTES del FBR con histéresis 0.5°C en el MC, 22/03/2024/3PM - 25/03/2024/3PM.

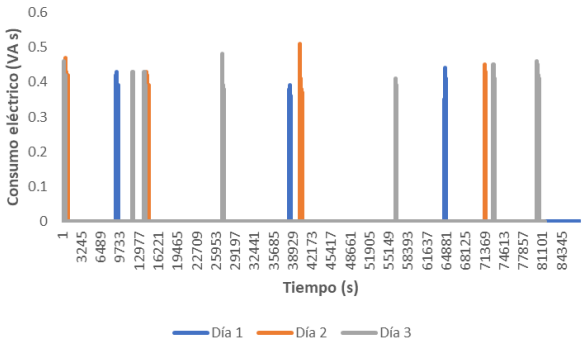


Figura 18.- CESTEP del FBR con histéresis 1°C en el MC, 25/03/2024/3PM - 28/03/2024/3PM.

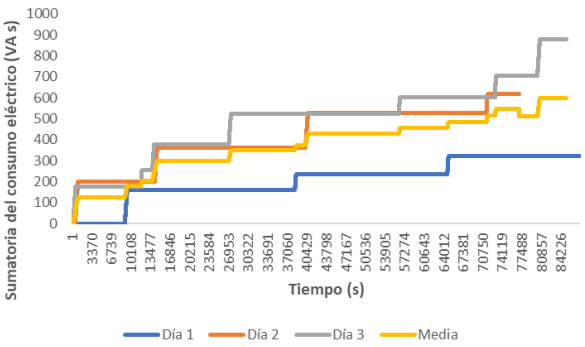


Figura 19.- Sumatoria del CESTEP del FBR con histéresis 1°C en el MC, 25/03/2024/3PM - 28/03/2024/3PM.

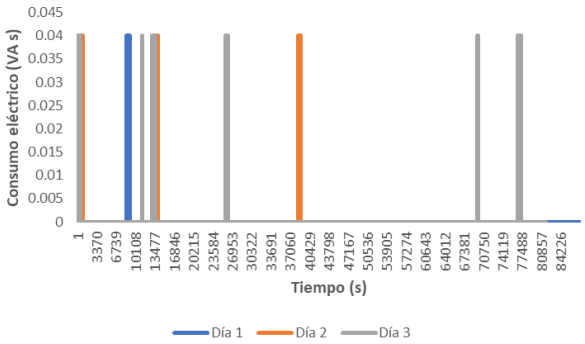


Figura 20.- CESTES del FBR con histéresis 1°C en el MC, 25/03/2024/3PM - 28/03/2024/3PM.

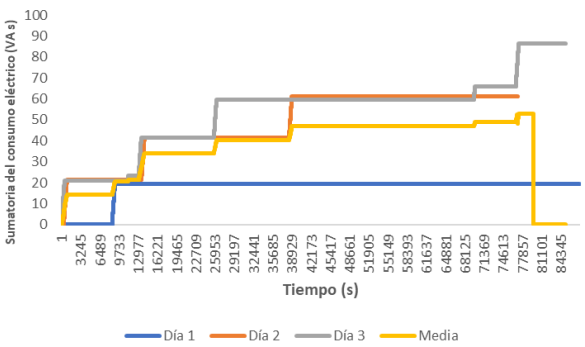


Figura 21.- Sumatoria del CESTES del FBR con histéresis 1°C en el MC, 25/03/2024/3PM - 28/03/2024/3PM.

ISSN: 2992-8338

Tabla 3.- Consumos eléctricos del sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor variando la histéresis de la temperatura de referencia del medio de cultivo.

		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9
Histéresis	(°C)	0.1	0.1	0.1	0.5	0.5	0.5	1	1	1
CE STEP		1255.76	1264.01	1484.38	1085.84	893.05	590.64	320.41	619.32	879.05
CEM STEP		1334.71 ± 129.67			856.51 ± 249.61			606.26 ± 279.54		
CE STES	(VA s)	53.26	63.69	75.46	113.93	92.44	52.39	19.56	61.18	86.33
CEM STES		64.13 ± 11.10			86.25 ± 31.23			55.69 ± 33.72		
CE STE		1309.02	1327.7	1559.84	1199.77	985.49	643.03	339.97	680.5	965.38
CEM STE		1398.85 ± 139.73			942.76 ± 280.81			661.95 ± 313.11		

5.- CONCLUSIÓN.

Los experimentos realizados tienen la finalidad de conocer a detalle el consumo eléctrico del sistema térmico del fotobiorreactor a partir de la variación de la histéresis de la temperatura de referencia en el medio de cultivo.

Los resultados obtenidos del consumo eléctrico conservan el comportamiento durante el inicio y el final del monitoreo (el día), así como el centro (noche), teniendo el día mayor números de encendidos respecto la noche, esto hace referencia a la diferencia que hay entre un día nublado y un día despejado, o bien, entre un día caluroso y un día menos caluroso.

El consumo eléctrico del sistema de control térmico de enfriamiento del fotobiorreactor, depende de las condiciones de la temperatura del medio ambiente, los resultados corroboran la necesidad de eficientizar el consumo eléctrico asociado a dicho sistema, lo que puede ser esencial para el éxito económico y medioambiental de los fotobiorreactores en regiones con altas variaciones en la temperatura ambiente.

Al aumentar la histéresis de la temperatura de referencia en el medio de cultivo se presenta una disminución en el número de encendidos del sistema térmico de enfriamiento, tanto en el primario como en el secundario y un aumento en el tiempo de operación de dichos sistemas térmicos. Sin embargo, se demostró a través de la experimentación que, a pesar del aumento del tiempo de operación del sistema térmico, fue más significativa la disminución de los encendidos de dicho sistema, por lo que se llega a la conclusión que al aumentar la histéresis de la temperatura de referencia en el medio de cultivo reduce el consumo eléctrico del sistema térmico en general y por ende aumenta la eficiencia en el fotobiorreactor de estudio.

6.- BIBLIOGRAFÍA

CONAGUA. (2021). Temperatura anual en México 2021.

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*.

Páez, J. G. (2023). Energy consumption and microalgal biomass production in a pilot-scale photobioreactor growing Nannochloropsis Oculata. *Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada*, 6.

Robles, J. A. (2023). The impact of ambient temperature variations on the cooling system of a photobioreactor and its relationship with energy consumption. *Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada*, 6.

Sukacova, K. (2021). Perspective design of algae photobioreactor for greenhouses a comparative study. *MDPI energies*.

Tonia, S. (2022). Pilot scale photobioreactor system for land-based macroalgae cultivation. *Journal of Applied Phycology*.

Torzillo, G. (2021). Temperature as an important factor affecting productivity and night biomass loss in Spirulina platensis grown outdoors in tubular photobioreactors. *Bioresource Technology*.



SOBERANÍA ALIMENTARIA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Review of Dehydration Techniques and Equipment for Fruits and Vegetables

P. D. Aquino-Domínguez*, J. Arce-Landa*, J. Reyes-Reyes*.

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N,*

Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.

E-mail: m23ce028@cenidet.tecnm.mx

Abstract:

Reference is made to the review of different techniques and equipment used in the dehydration of fruits and vegetables. The potential of each dehydration technique and its effect on the removal of water from the products to be dehydrated are pointed out. Likewise, the different equipments shown in the literature are identified, with the objective of identifying the advantages and disadvantages in the dehydration of fruits and vegetables.

Keywords: *dehydration, techniques, equipment, water removal,*

1. INTRODUCCIÓN

La industria de alimentos tiene como misión entregar productos inocuos y nutritivos, que preserven la salud de la población, por lo cual centra gran parte de su atención y recursos en generar procesos que aseguren esta calidad en cuanto a inocuidad. Sin embargo, la calidad de los productos es esencial, además de ser ricos en nutrientes, es importante que conserven sus características iniciales lo cual representa un gran desafío.

En la actualidad existen distintas técnicas, procesos y equipos diseñados para la conservación de los alimentos y a su vez asegurar la inocuidad de los mismos, sin embargo, es necesario la mejora constante de estas técnicas y equipos para cumplir con los estándares de calidad apegados a las Normas Oficiales Mexicanas. Por lo anteriormente descrito, son fundamentales las investigaciones que apunten al desarrollo de nuevas técnicas o mejoramientos de las ya existentes.

La deshidratación de alimentos en términos básicos se refiere a la remoción de agua del producto. Resulta importante conservar los parámetros organolépticos del alimento, debido a que una mala práctica puede provocar reducciones en el valor nutritivo del producto a deshidratar. En particular, la pérdida de vitaminas A y C puede ser mayor durante el secado que en el enlatado o la congelación. La deshidratación se describe usualmente como una operación simultánea de transferencia de calor y masa. Se debe transferir calor sensible y latente al alimento para que el agua se evapore.

El secado de alimentos es uno de los procesos más antiguos usados para la conservación de alimentos, siendo hoy en día uno de los métodos más comunes y de mayor importancia en la industria de alimentos para la producción de productos sólidos (Fellows, 2000).
El secado también reduce el peso del producto alimenticio. El encogimiento, que ocurre con frecuencia durante el secado, reduce el volumen del producto. Estos cambios de peso y volumen pueden conducir a ahorros sustanciales en los costos de transporte y almacenamiento y, en algunos casos, a los costes de envasado.

Sin embargo, la deshidratación es un proceso intensivo en energía y el costo de suministrar esta energía puede ser relativamente alto, en comparación con otros métodos de conservación.

Con la aplicación de ciertas técnicas de secado se logran obtener productos deshidratados de mayor calidad como por ejemplo la deshidratación y la liofilización, sin embargo, esta última técnica tiene como desventaja los altos costos de implementación y operación. Por lo tanto, resulta interesante investigar sobre técnicas de deshidratación haciendo uso de energías limpias y/o renovables.

Derivado de lo anterior, se ha realizado una revisión de la literatura, para mostrar las técnicas y equipos de deshidratación que pueden emplearse para deshidratar frutas y verduras en razón de la naturaleza y condiciones del producto que se pretende deshidratar. La deshidratación resulta ser una técnica apropiada para la remoción de agua ligada al producto; logrando una reducción de Actividad de Agua representada como (Aw) y asegurando la conservación del producto.

Con la finalidad de conseguir una deshidratación homogénea y segura del producto, existe evidencia de que los secadores y/o deshidratadores solares son una alternativa eficiente para tal propósito, ya que es posible tener un control de los mecanismos de transferencia de calor al interior de dichos equipos, y de aprovechar la radiación solar. La aplicación de la técnica de deshidratación solar de alimentos resulta ser una alternativa amigable con el medio ambiente.

ISSN: 2992-8338

2. TÉCNICAS DE DESHIDRATACIÓN

La clasificación de las técnicas de secado o los equipos utilizados para este fin se puede realizar según las características y propiedades físicas del producto húmedo o el mecanismo de trasferencia de calor asociado al proceso. Es este último el más utilizado ya que resulta más interesante industrialmente y revela diferencias en el diseño y funcionamiento de los equipos. De acuerdo al segundo criterio (mecanismos de transferencia) se distingue la siguiente clasificación (Maupoey, 2001).

2.1 Secadores Directos

Utilizan gases calientes en contacto directo con el alimento húmedo para suministrar el calor y además arrastrar el agua vaporizada. Para este tipo de secadores predomina la convección como mecanismo de transferencia de calor y son los más ampliamente utilizados en la industria.

Ejemplos de este tipo de secadores son: Secador de bandejas, secador de túnel, secador rotatorio, secador de horno o estufa y secador por aspersión

2.2 Secadores Indirectos

El calor se transmite al sólido húmedo a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado de forma independiente del medio calefactor. En este caso el mecanismo de transferencia de calor predominante es la conducción, sin embargo, también están presentes en ciertos niveles los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación.

Como ejemplos de secadores indirectos se pueden mencionar al secador de tambor, el secador indirecto al vacío con anaqueles y a la ventana refractiva.

2.3 Secadores Dieléctricos y Microondas

Se consideran dentro de esta clasificación todos los equipos que usan las frecuencias electromagnéticas superiores o iguales al espectro de infrarrojos. Generalmente se dice que el calentamiento dieléctrico se realiza a frecuencias entre 1 y 100 MHz, mientras que el calentamiento por microondas funciona entre 300MHz y 300GHz. Aunque los principios básicos de calentamiento y secado en frecuencias dieléctricas y microondas son los mismos, los métodos de generación y equipos son diferentes. Un hecho crucial que debe tenerse siempre presente es que "microondas y dieléctricos" no son formas de calor sino formas de energía que se manifiestan como calor a través de su interacción con la materia.

2.4 Secadores por Radiación

Se basan en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. Esta energía se produce eléctricamente (infrarrojos) o por medio de refractarios únicamente calentados con gas. Cuando la radiación térmica se dirige hacia un cuerpo, esta puede ser absorbida (convertida en calor), reflejada desde la superficie del cuerpo, y/o transmitida a través del material

Es justamente la energía absorbida que puede proporcionar calor para los propósitos de secado. Generalmente, en materiales sólidos toda la energía radiante se absorbe en una capa muy poco profunda debajo de la superficie. Por lo tanto, el secado radiante es más adecuado para secar capas delgadas o láminas de material o recubrimientos. En el caso de los alimentos, existen relaciones complejas entre sus propiedades físicas, térmicas y ópticas. Estos, a su vez, influyen en la medida en que la energía radiante es absorbida por los alimentos. Los componentes de proteínas, grasas y carbohidratos de los alimentos tienen sus propios patrones de absorción. El agua en forma líquida, de vapor o en forma sólida también tiene patrones de absorción característicos que influyen sobre la absorción de energía radiante. Es muy difícil lograr un calentamiento uniforme de los alimentos mediante calor radiante. El control de la velocidad de calentamiento también es un problema (Brennan, 2006).

Ejemplos para este tipo de secadores son: Secador solar y ventana refractiva.

La clasificación realizada anteriormente se hizo en función del mecanismo de transferencia de energía utilizado para deshidratar el alimento. Se detalló además algunos ejemplos para cada clasificación, sin embargo esta clasificación deja fuera a la liofilización la cual si bien se usa bajo condiciones específicas en la industria también es la técnica que entrega mejores resultados.

3. EQUIPOS DE DESHIDRATACIÓN

En lo que respecta a los sistemas de secado, se han probado diversos arreglos para su clasificación, entre ellos la transferencia de masa y calor se realiza por convección natural o convección forzada. En la Figura 1 se presenta una clasificación de los deshidratadores de acuerdo a los mecanismos de transferencia de calor y al mecanismo de transporte de masa. En los casos de convección forzada la velocidad del aire se genera y se controla por un ventilador, la potencia para calentar el aire netamente con energía solar o sistemas híbridos.

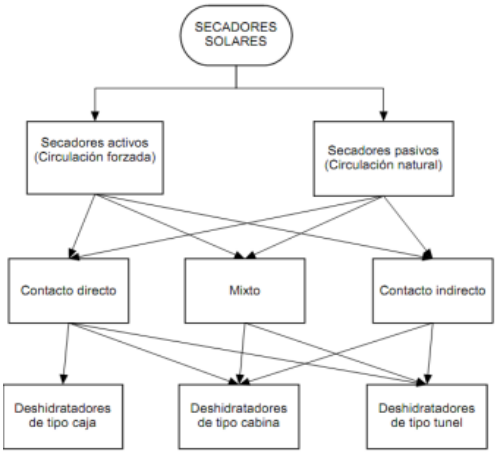


Figura 1. Clasificación de deshidratadores solares según la transmisión de calor.

ISSN: 2992-8338

3.1 Secado por Aire Caliente o Convencional

Cuando se coloca un material húmedo en una corriente de aire caliente, el calor se transfiere a su superficie, principalmente por convección. El vapor de agua formado es arrastrado lejos de la superficie de secado en la corriente de aire. Si se considera un sistema en el que un material húmedo, que consiste en un sólido inerte humedecido con agua pura, en forma de una placa delgada, se coloca en una corriente de aire caliente, que fluye de forma paralela a una de sus caras. La temperatura, la humedad y la velocidad del aire se mantienen constantes, se supone además que todo el calor se transfiere al sólido desde el aire por convección y que el secado tiene lugar sólo desde una dirección (superficie).

En la Figura 2 se representa la tasa de cambio (dH/dt) del contenido de humedad como función del tiempo:

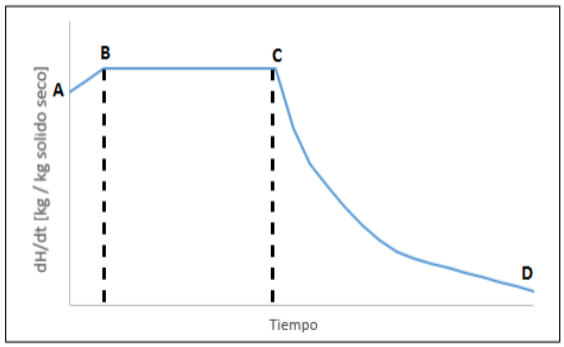


Figura 2. Tasa de cambio de humedad en el tiempo para un proceso de secado con aire caliente.

El periodo A-B es comúnmente conocido como periodo de sedimentación o equilibrio. La superficie del sólido húmedo entra en equilibrio con el aire. Este período suele ser corto comparado con el tiempo total de secado. El período B-C se conoce como período de tasa deshidratación constante. Durante este período la superficie del sólido se satura con agua.

A medida que el agua se evapora de la superficie, el agua del interior del sólido se desplaza a la superficie, manteniéndola en estado saturado

Los gases calientes pueden ser:

- Aire caliente por medio de resistencias eléctricas.
- Aire caliente por medio de vapor de agua.
- Productos de la combustión.
- Gases inertes.
- Vapor recalentado.
- Aire caliente por medio de la radiación solar.

Este tipo de secadores pueden ser continuos o de tipo batch, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros y utilizándose los segundos para bajas capacidades de producción y para el tratamiento de productos que exigen manipulación especial (Maupoey, 2001).

3.2 Secador de Túnel

Este tipo de secador consiste en un largo túnel aislado térmicamente en donde el alimento a secar se carga en carros con bandejas. Estos carros entran por uno de los extremos del túnel avanzando a una velocidad determinada, avanzan por toda la extensión del túnel para luego ser removidos por el extremo opuesto.
Por otra parte, el aire caliente fluye también por el túnel a través de las bandejas, las cuales pueden estar perforadas permitiendo el flujo del aire en dirección perpendicular al flujo de los carros y el aire. Existen también configuraciones particulares para este tipo de secador las cuales dependen de la dirección del aire con respecto a la posición de los carros, teniéndose operación co-corriente (flujo en el mismo sentido) y contracorriente (flujo en sentido contrario), para ambas con flujo de un paso de aire y además con recirculación de este (Brennan, 2006).

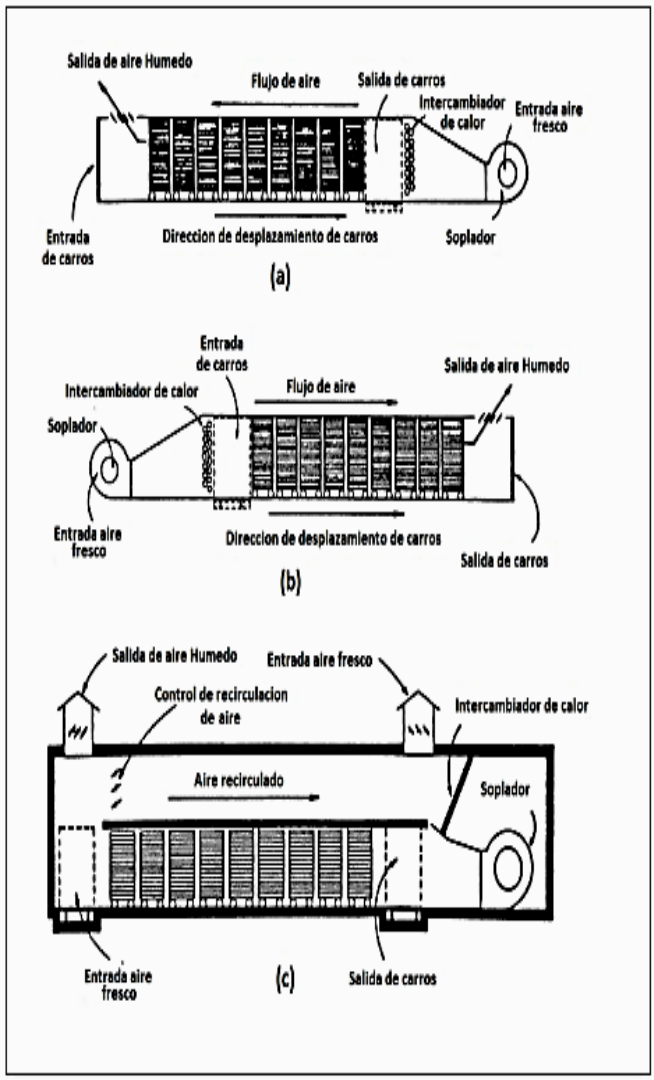


Figura 3. Configuraciones de túnel de aire para secado.

ISSN: 2992-8338

Ventajas

- Su funcionamiento es continuo, lo que permite grandes flujos de procesamiento.
- Se pueden secar gran variedad de alimentos.
- Son de operación sencilla.

Desventajas

- Alto costo de mano de obra para carga y descarga.
- Tiempos de secado relativamente altos.
- No es rentable a baja escala de producción.
- Solo puede secar productos sólidos.

3.3 Secador Tipo Cabina

En la Figura 4 se muestra un secador tipo cabina, el cual consta de una cubierta transparente del lado sur y de una cubierta negra del lado norte. Por los lados este y oeste están abiertos para permitir la circulación de aire. El producto se distribuye en una rejilla. Estos secadores son baratos y de fácil instalación. Se pueden construir con estructuras de madera y cubiertas de malla para permitir el paso de aire en donde es requerido. Los secadores del tipo cabina son de construcción sencilla y económica, se recomiendan para el secado de productos agrícolas.

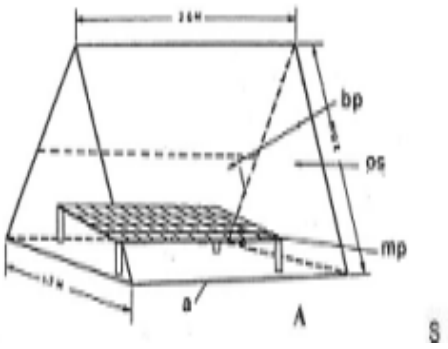


Figura 4. Secador tipo cabina.

En la actualidad existen una gran variedad de sistemas colectores de energía solar. Cada uno de ellos ofrece ventajas y desventajas respecto a los demás. Las principales características a considerar para su selección figuran las siguientes:

1. Costo.
2. Nivel de temperatura a operar en el sistema.
3. Potencia de energía a colectar.
4. Facilidad de operación y complejidad.
5. Nivel de automatización.

4. CONCLUSIONES

El secado o deshidratación es un método de conservación de los alimentos mediante la aplicación de aire caliente, siendo una de las formas de conservación de alimentos más antiguas, permitiendo la reducción del agua contenida en el interior de los alimentos y de esta forma evitar el crecimiento de microorganismos (Espinoza, 2016). Con ello se logra una reducción significativa de Actividad de Agua (Aw).

Por otra parte, empleando secadores y/o deshidratadores solares, se logra una deshidratación uniforme de los productos, aprovechando energías limpias y no contaminates.

Cabe señalar, que la selección del tipo y diseño del secador y/o deshidratador solar, está en función de las características y de la naturaleza de los productos a deshidratar. Considerando como referente:

- Características físicas del secadero.
- Rendimiento térmico.
- Calidad del producto desecado.

La revisión de la literatura muestra como es posible llevar a cabo el proceso de deshidratación de frutas y verduras, sin consumo de energía convencional, por lo que es posible implementar este proceso sin contaminar emitiendo cero emisiones de CO_2 al ambiente.

REFERENCIAS

Berques, C. & Díaz, J. (2014). Diagramas de tendencia para la generalización sostenible de secadores solares directos de productos agropecuarios. Revista Tecnología Química. ISSN 2224-6185.

Barbosa-Cánovas, G. V.-M. (2000). Deshidratación de Alimentos.

Deid-Mahd, J. D. (2015). COMPARING QUALITY CHARACTERISTICS OF OVEN-DRIED. Journal of food science, 362-372.

Espinoza, J. (2016). Innovación en el deshidratado solar. *Revista chilena de ingeniería, 24*, 72-80.

Fellows, P. (2000). Food Processing Technology, Principles and Practice. New York: woodhead publishing limited.

González, C., Ponce, C., Valenzuela, R. & Campos, D. (2013). Selección de un sistema solar fotovoltaico para un vehículo eléctrico. Revista Culcyt. ISSN 2007-0411.

Holman, J. (1998). Transferencia de calor. Madrid: McGraw - Hill Maupoey,

Iriarte, A., Bistoni, S., García, V. & Luque, V. (2013). Evaluación de un secadero solar tendalero túnel: estudio se secado de manzanas. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. ISSN 2314-1433.

ISSN: 2992-8338

lves R. A., Queiroz A. J. D. M., de Figueirêdo R. M., Silva W. P. D., y Gomes J. P. (2019). Solar drying of cowpea bean combined with drying in a heat accumulator dryer. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 23, 709-715.

Jadán Piedra, F. (2017). Enzymatic browning control in cut apples (Red delicious) through a system of active packaging. *Enfoque UTE*, *8*(2), pp. 66 - 77.

Manual de deshidratación. 2018, Publicación de la Universidad Técnica del Norte. Ibarra-Ecuador.

Villarroel, D. (2007). *Introducción al secado y deshidratación.* Quito: Universidad de las Américas.

Zaragoza, España: Acriba S.A. Capariño, O. T. (2012). Effect of Drying Methods. Journal of Food Engineering, 111, 135-148.

ISSN: 2992-8338

Evaluation of environmental conditions for a Pleurotus ostreatus fruiting chamber.

Jazmín Sarahí Jiménez Ramos, *María Josefa Tlatelpa Cuevas, ** S.P. Pérez Sabino, *C.M. Astorga Zaragoza*

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N Col, Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México. Correo electrónico: m23ce032@cenidet.tecnm.mx, patricia.ps@cenidet.tecnm.mx, carlos.az@cenidet.tecnm.mx **Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 62210 Cuernavaca, Morelos, México. Correo electrónico: maria.tlaltepa@uaem.edu.mx

Abstract: The cultivation of edible mushrooms, especially Pleurotus ostreatus, is essential due to their high nutritional and economic value. Although there are thousands of species of Macromycetes fungi, only a few are suitable for human consumption, and Pleurotus ostreatus is one of the most studied and cultivated due to its resistance, economic and nutritional potential. During the evaluation of the fruiting process, an experiment was carried out in the first harvest, which showed that it is important to control variables such as temperature, humidity, ventilation and lighting. Therefore, it is proposed to design an automated home chamber to fructify Pleurotus ostreatus at any time of the year, controlling these variables precisely. First results show that adequate temperature and humidity conditions are essential for successful fruiting.

Keywords: Pleurotus ostreatus, variables, design, temperature, fruiting, humidity.

1. INTRODUCCIÓN

Se calcula que de las 70 000 especies de hongos *Macromycetes* que producen cuerpos fructíferos, solo alrededor de 2 000 son adecuados para el consumo humano, y de estos, apenas 30 se cultivan comercialmente. Uno de los hongos comestibles más estudiados y cultivados ha sido el *Pleurotus ostreatus*, conocido también como hongo seta, hongo del cazahuate (Estrada Popoca, E. J. 2023). Es resistente y fácil de propagar, además de tener un gran potencial económico y nutricional en comparación con otras especies de hongos comestibles (Gaitán- Hernández, 2006).

La relevancia nutricional de los hongos comestibles se fundamenta principalmente en su contenido de proteínas (entre un 20 % y un 40 %), bajo en carbohidratos (entre un 36 % y un 47 %), grasas (entre un 0.5 % y un 5.0 %), y un considerable contenido de fibra (entre un 23 % y un 31 %) (Barba, 2019), así como en otros nutrientes, tiamina (vitamina), piridoxina (vitamina B 6), ácido ascórbico, cobalamina (vitamina B12) (Estrada Popoca, E. J. 2023). Por esta razón, constituyen una excelente fuente de proteínas, vitaminas y minerales.

Entre los micronutrientes, el potasio es el más abundante, seguido por el fósforo, magnesio, sodio, calcio, hierro, zinc, manganeso y cobre (*Deepalakshmi y Mirunalini*, 2014). Además, durante el proceso de producción, los hongos contribuyen a la degradación de subproductos agrícolas, lo que ayuda a mitigar problemas de contaminación que a menudo no son aprovechados por las familias (Donado, 2014).

En México, esto ha afectado la seguridad alimentaria de la población y su derecho a acceder a alimentos saludables y nutritivos, así como a una dieta equilibrada y variada (Mayett y Martínez-Carrera, 2019). Los hongos comestibles representan una buena opción para hacer frente a estas crisis, ya que constituyen un sistema de producción y consumo que involucra procesos biotecnológicos aplicados, que pueden ser desarrollados tanto a pequeña como a gran escala para producir: alimentos humanos de alta calidad nutritiva y con propiedades medicinales, suplementos dietéticos y enzimas y productos metabólicos de importancia industrial (Martínez-Carrera et al., 2004) (Mora y Martínez-Carrera, 2007).

En México, el cultivo tradicional y aprovechamiento de hongos comestibles ha sido promovido durante más de 70 años, tanto en pequeña como en gran escala, principalmente con variedades como el Champiñón *Agaricus*, las Setas *Pleurotus* y el *shiitake Lentinula.* Su valor económico alcanza los 200 millones de dólares anuales (Mora y Martínez-Carrera, 2007).

El impacto ambiental dentro del ODS 1 Fin de la pobreza: El cultivo casero de hongos puede proporcionar una fuente de ingresos adicionales para las personas que viven en áreas rurales o con recursos limitados. Esto puede contribuir a reducir la pobreza al proporcionar una fuente de alimento nutritivo y una oportunidad de generación de ingresos (ONU, 2018).

Respecto al ODS 2 Hambre cero: El cultivo casero de *Pleurotus ostreatus* puede tener aportaciones en la seguridad alimentaria, especialmente en áreas donde la disponibilidad de alimentos frescos es limitada.

El ODS 3 Salud y bienestar: Los hongos *Pleurotus ostreatus* son conocidos por sus propiedades nutricionales y medicinales. Su consumo puede mejorar la salud, ya que son bajos en calorías y grasas, y ricos en proteínas y fibra. Además, contienen compuestos bioactivos que pueden tener efectos beneficiosos para la salud, como fortalecer el sistema inmunológico y reducir el riesgo de enfermedades crónicas.

ISSN: 2992-8338

Con relación al ODS 9 Industria, innovación e infraestructura: El diseño de una cámara de fructificación eficiente y sostenible para el cultivo, implica innovación en tecnología agrícola y diseño de infraestructura.

Finalmente, el ODS 12 Producción y consumo responsable: El cultivo casero de hongos promueve un modelo de producción más sostenible y local. Los hongos pueden cultivarse en sustratos orgánicos, utilizando materiales de desecho agrícola o forestal. Además, al ser cultivados localmente, se reducen las emisiones de carbono asociadas con el transporte de alimentos.

El cultivo tradicional o artesanal de estos hongos, requiere el monitoreo de las variables: temperatura, humedad, ventilación e iluminación; condiciones específicas para su desarrollo, que garantizan también sus características nutricionales. Un aspecto interesante es el lograr automatizar la fructificación para el *Pleurotus ostreatus.*

1.1 Cultivo de hongos comestibles

El cultivo de hongos involucra diversas operaciones que deben llevarse a cabo con atención. Las condiciones para la preparación, inoculación, incubación y producción del sustrato varían según las especies de hongos que se vayan a cultivar (Gaitán- Hernández, 2006).

En la fig. 1 se muestra un resumen del proceso general de producción del hongo *Pleurotus ostreatus* a partir de la producción (Gráfico)

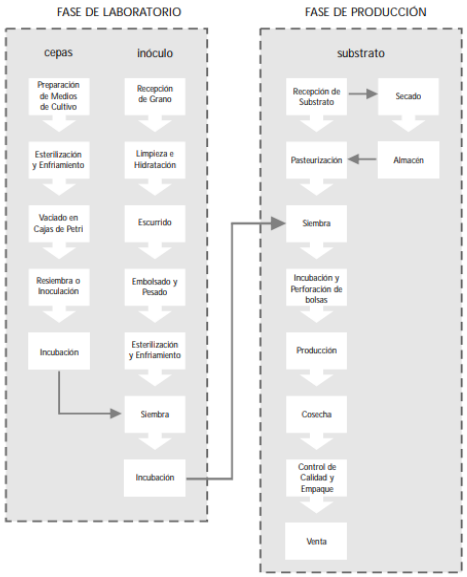


Fig. 1. Diagrama de flujo para la producción de *Pleurotus.*

Fuente: Manual práctico del cultivo de hongos setas

Para la fructificación del *Pleurotus ostreatus* se acostumbra utilizar el diseño artesanal que lo limita a su cultivo en cierta época del año en el mes de agosto a septiembre ya que cumple con las condiciones óptimas para la fructificación (SEGOB, 2019).

Por ello la propuesta es diseñar una cámara casera que fructifique el hongo *Pleurotus ostreatus*, en cualquier época del año, midiendo las variables de temperatura, humedad, ventilación e iluminación de una manera automatizada. Cuando se tienen un control correcto de los sistemas, se puede mantener una o más variables dentro de los límites establecidos preestablecidos para una mejor fructificación (Ruiz & Molina, 2021).

2. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el estudio de fructificación del *Pleurotus ostreatus*, desglosa el proceso en tres etapas, destacando los objetivos, procedimientos y herramientas utilizados en cada una.

Tiene como objetivo estudiar y optimizar las condiciones necesarias para la correcta fructificación del *Pleurotus ostreatus* a través de tres etapas de desarrollo de prototipos, cada una con un nivel creciente de sofisticación y control de variables ambientales.

La metodología se divide en tres etapas:

1) Fructificación artesanal con monitoreo manual.

2) Desarrollo de un prototipo con sensores para un monitoreo más preciso.

3) Implementación de un sistema automatizado para controlar las variables ambientales clave.

Etapa 1: Fructificación Artesanal

Se inicia con un enfoque artesanal utilizando un primer prototipo. Se monitorean manualmente las variables ambientales importantes: temperatura, humedad, ventilación y luz.

Objetivo: Obtener datos iniciales sobre las condiciones de fructificación y establecer un registro cuantitativo de las variables.

Herramientas y Técnicas: Termómetros, higrómetros, registros manuales, observación directa.

Resultados Esperados: Datos preliminares sobre las condiciones ideales para la fructificación artesanal del *Pleurotus ostreatus*.

Etapa 2: Prototipo con Sensores

Se desarrolla un segundo prototipo que incluye sensores de humedad y temperatura, un humidificador ultrasónico y aspersores.

ISSN: 2992-8338

Objetivo: Mejorar el monitoreo de las variables ambientales para obtener datos más precisos y consistentes.

Herramientas y Técnicas: Sensores de humedad y temperatura, humidificador ultrasónico, aspersores, sistema de registro digital.

Resultados Esperados: Datos más precisos y detallados sobre las condiciones ambientales necesarias para la fructificación.

Etapa 3: Prototipo con Sistema de Automatización

Se construye un tercer prototipo que incorpora un sistema de automatización para controlar las cuatro variables fundamentales: temperatura, humedad, ventilación y luz.

Objetivo: Optimizar y automatizar el proceso de fructificación, asegurando condiciones óptimas constantes.

Herramientas y Técnicas: Controladores automatizados, software de gestión ambiental, sensores avanzados, sistemas de ventilación e iluminación automatizados.

Resultados Esperados: Control preciso y constante de las variables ambientales, facilitando una fructificación óptima y eficiente del *Pleurotus ostreatus*.

Para este estudio se realizará un seguimiento de las condiciones necesarias para la correcta fructificación del *Pleurotus ostreatus*, teniendo en cuenta los factores ambientales. Se desarrollarán 3 prototipos; para el primero de ellos se adquirió una bolsa de micelio y se diseñó y desarrollo el prototipo artesanal, como se describe continuación.

2.1 Prototipo 1 (artesanal)

En esta primera etapa se comienza a trabajar realizando un fructificador artesanal, que está construido de madera, con una estructura base de 70cm de largo, 60cm de ancho y una altura de 80cm. Fig. 2 Diseño artesanal del primer prototipo.



Fig. 2. Prototipo 1 Diseño de madera para la fructificación del *Pleurotus ostreatus.*

Con base a la literatura y de acuerdo a la experimentación realizada durante una semana se pudo corroborar que es necesario colocar una malla alrededor de la base de madera para que la fructificación se realice de manera óptima, evitando una contaminación por insectos en este modelo.

Durante el proceso de incubación y fructificación, los sustratos colonizados por el micelio de *Pleurotus ostreatus* suelen atraer insectos como *Lycoriella mali, Coboldia fuscipes, Mycophila sp., Megaselia tamiladuensis*, los cuales se alimentan del micelio y de los cuerpos fructíferos, y pueden transmitir ácaros y enfermedades (Albán, 2018). También pueden ser atractivos para ácaros como *Tarsonemus sp*. y *Histiostoma sp.,* que transmiten patógenos y nematodos (Muñoz, 2017).

Para prevenir problemas de plagas, es recomendable aislar los espacios de incubación y fructificación o recurrir a métodos de control físico. Sin embargo, no se recomienda el uso de pesticidas o sustancias químicas (Zárate, 2015). En la Fig. 3**,** se muestra la malla, utilizada para proteger el *Pleurotus.*



Fig. 3. Malla protectora del fructificador

2.2 Prototipo 3 Diseño Automatizado

Para el diseño de este tercer prototipo, se busca reducir costos en los materiales de fabricación, y que permitan que la fructificación se adecuada, automatizando el sistema de control de variables: temperatura, humedad, ventilación e iluminación. En la fig. 4 se muestra un prototipo del diseño.

ISSN: 2992-8338

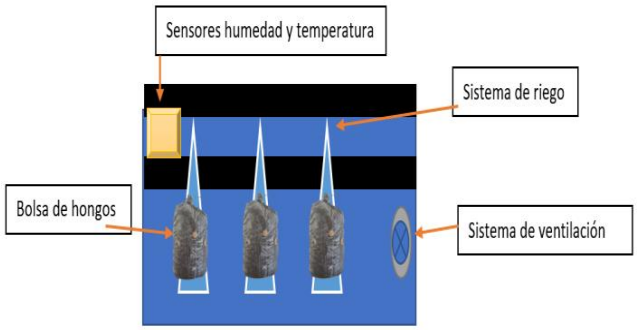


Fig. 4. Diseño del fructificador.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta etapa inicial, se adquirió un costal con micelio para llevar a cabo la fructificación del *Pleurotus* de manera artesanal. En la figura 5 se muestra el proceso de adquisición del costal con micelio.



Fig. 5. Costal con micelio y primordios.

En la etapa de fructificación es importante recordar las condiciones que se deben de mantener para una fructificación adecuada.

Durante esta etapa, se desarrollaron los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus*, lo que implicó necesidades ambientales diferentes. Las condiciones proporcionadas para esta etapa incluyeron mantener una temperatura entre 25 y 26°C, hacer agujeros en las bolsas, realizar riegos diarios, asegurar ventilación y proporcionar 12 horas de luz (Montaño et al., 2017).

El prototipo 1 se colocó en su lugar y se comenzó a regar tres veces al día para mantener la humedad necesaria. Además, se instaló un termómetro para monitorear la humedad y la temperatura. Durante los primeros tres días, el riego se realizó de la misma manera y se observó una buena fructificación. En la Figura 6 se muestra el crecimiento de estos primordios.



Fig. 6. Costal con fructificación de primordios.

Se continua con el proceso de fructificación, pero al analizar que la humedad está disminuyendo, se procede a regar cada 3hrs, y se puede observar que el fruto comienza a cambiar de color, esto se debe a falta de humedad y la temperatura no es la adecuada.

El no contar con las condiciones adecuadas de temperatura, humedad provocan que el fruto, no se desarrolle de la manera correcta, y que solamente se enfoque en una cosecha muy escasa. Fig. 7 Se observa el cambio de color en el fruto y pocos frutos.



Fig. 7. Costal con fruto, ausencia de humedad y una temperatura no óptima.

ISSN: 2992-8338

La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos durante los primeros 15 días. Debido a la falta de humedad y una temperatura más alta de lo necesario para una fructificación correcta, durante este período obtuvimos la primera cosecha.

Tabla 1. Monitoreo del primer prototipo

Día	Temperatura	Humedad	Luz
1	32° C	90%	12 HRS
2	36°C	85%	12HRS
3	34°C	80%	12HRS
4	28°C	70%	12HRS
5	27°C	65%	12HRS
6	30° C	70%	12HRS
7	29°C	65%	12HRS
8	28°C	70%	12HRS
9	30° C	75%	12HRS
10	29°C	70%	12HRS
11	28°C	75%	12HRS
12	30° C	80%	12HRS
13	29°C	75%	12HRS
14	28°C	80%	12HRS
15	27°C	80%	12HRS

En esta etapa obtuvimos 4 racimos de *Pleurotus ostreatus*, los cuales se muestran en la Figura 8 "Fructificación de la primera cosecha del prototipo uno".



Fig. 8. Primera cosecha del prototipo uno.

Se espera los resultados de la siguiente cosecha, en la cual se está cuidando algunas variables como la humedad, temperatura, ventilación e iluminación, en otro espacio físico, esperando se obtenga una fructificación más saludable.

CONCLUSIONES

El desarrollo de una cámara casera automatizada para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* es una solución prometedora para garantizar la producción durante todo el año. A través de un estudio en tres etapas que abarca la fructificación artesanal, la implementación de sensores y sistemas automatizados de control, y la construcción de un prototipo mejorado, se ha demostrado que las condiciones adecuadas de temperatura y humedad son cruciales para una fructificación exitosa.

Este proyecto no solo tiene beneficios nutricionales y económicos, sino que también puede contribuir a la seguridad alimentaria y al desarrollo sostenible. Al cumplir con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, como la erradicación de la pobreza, la lucha contra el hambre, la promoción de la salud y el bienestar, y la producción y consumo responsables, el cultivo de hongos comestibles, especialmente *Pleurotus ostreatus*, puede jugar un papel importante en la mejora de la calidad de vida y el cuidado del medio ambiente.

REFERENCIAS

Gaitán-Hernández, R., Salmones, D., Pérez-Merlo, R., & Mata, G. (2006). Manual práctico del cultivo de setas: aislamiento, siembra y producción. Instituto de Ecología, AC, Xalapa, México.

Acosta, L. (2020) Inhibición micelial de *Trichoderma spp. (Hypocreaceae)* aislado del cultivo de *Pleurotus ostreatus (Pleurotaceae)* con un extracto de *Pycnoporus sp. (Polyporaceae)* pilletahttps://abm.ojs.inecol.mx/index.php/abm/article/view/1537.

Barba, M; Assumpção, F; Aparecida, H; López, G; Ávila, S; Silveira, P. (2019). Review: Factors affecting mushroom Pleurotus spp. Saudi J Biol Sci. 2019; 26:633- 646.

Deepalakshmi, K; Mirunalini, S. (2014). *Pleurotus ostreatus: an oyster mushroom with nutritional and medicinal properties. J Biochem Tech.*; 5(2):715-726.

Donado, T. (2014). Evaluación de tres sustratos para la producción de hongo ostra *(Pleurotus ostreatus*) Moyuta, Jutiapa (en línea). Tesis de Lic. Universidad Rafael Landívar, Guatemala. 62 pp. Consultado 28 abril. 2024. Disponible en:

ISSN: 2992-8338

http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2014/06/17/Donado-Tania.pdf

Martínez-Carrera, D., Aguilar, A., Martíınez, W., Morales, P., Sobal, M., Bonilla, M., *and Larqu´e-Saavedra, A. (2004). A sustainable model for rural production of edible mushrooms* in México. Micología Neotropical Aplicada, 11, 77–96.

Mayett, Y. and Marínez-Carrera, D. (2019). El consumo de hongos comestibles y su relevancia en la seguridad alimentaria de México. Los hongos comestibles, funcionales y medicinales: aportación a la dieta, la salud, la cultura y al sistema agroalimentario de México, 293– 329.

Mora, V. and Martíınez-Carrera, D. (2007). Investigaciones básicas, aplicadas y socioeconómicas sobre el cultivo de setas (*pleurotus*) en México. El cultivo de setas *Pleurotus spp*. en México, 69–110.

Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G. 2681-P/Rev. Consultado 27 abril. 2024. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/

Segob, (2019). Cultivo de setas, una actividad agrícola con potencial. Consultado 27 abril. 2024. Disponible en: https://www.gob.mx/bienestar/articulos/cultivo-de-setas-una-actividad-agricola-con-potencial

Albán, L. (2018). Cultivo de hongo ostra (*Pleurotus ostreatus*) en tres tipos de residuos de la madera de bolaina blanca (Guazuma crinita) (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina)

Muñoz, E.N. (2017). Comparativo de dos sustratos y cuatro paquetes tecnológicos utilizados en la producción comercial de *Pleurotus ostreatus* (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina)

Zárate, J.R. (2015). Producción y desarrollo de cuatro aislamientos de *Pleurotus ostreatus*, cultivados en restos de cosecha (Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina)

Montaño, Y. S. V., & Peña, Y. W. M. (2017). Diseño de un sistema de monitoreo y control de cámaras de incubación y fructificación para la producción de hongos comestibles y medicinales. Journal Boliviano de Ciencias, 13(39), 44-53.

Estrada Popoca, E. J. (2023). Evaluación de cultivo de Pleurotus ostreatus (hongo oreja de cazahuate) en dos condiciones de cultivo.

Toro Rey, J. C. (2023). Monitoreo y control de la temperatura de rocío para la producción de Pleurotus Ostreatus en Restrepo-Meta.

Ruiz Canales, A & Molina Martínez, J.M. (2021) Fundamentos de los sistemas de control del riego y la fertilización (Parte I). Infoagro Systems, S.L. Recuperado el 8 de febrero del 2021, en: https://www.infoagro.com/documentos/fundamentos_sistemas_control_del_riego_y_fertiliz acion parte_i_.asp

ISSN: 2992-8338

Long-range wireless sensor network for monitoring agricultural variables in areas without internet access

E. Salgado-Lampart[1], C. Morales-Morales[2], A. González-Lorence[2], M. Castro-Bello[1], A. L. Mondragón-Solís[3]

[1]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: mg23520005@chilpancingo.tecnm.mx, mirna.cb@chilpancingo.tecnm.mx

[2]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: cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx, armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx

[3]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Antonio García Cubas No. 600, Fovissste, C.P. 38010, Celaya, Guanajuato.
e-mail: ana.mondragon@itcelaya.edu.mx

Abstract: This paper presents the connectivity capacity of a long-range Wireless Sensor Network (WSN) using Lora communication technology, applied in areas without internet access to monitoring agricultural activities. The ability to collect data of agricultural variables in an automated way, without human intervention, from its measurement, through analog and digital sensors installed in the Sensor Node's and sending through the standard JSON information exchange, between Sensor Node's and Gateway Node. The information storage is performed in a database in the cloud through the consumption of webservices APIs for retrieval in a WEB application.

Keywords: Sensors, LoRa, IoT, Web Services, WSN, Agricultural.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la aplicación de Internet de las Cosas (IoT) y las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) ha ganado gran relevancia en el sector agrícola. Estas tecnologías permiten la recopilación y análisis de datos en tiempo real, lo que conduce a una mayor eficiencia en la gestión de los recursos y un aumento en la productividad (De Carvalho Silva et al., 2017).

Las WSN están compuestas por nodos sensores distribuidos geográficamente, que recopilan datos sobre variables como la temperatura, humedad del suelo, niveles de nutrientes, entre otros. Estos datos son transmitidos de manera inalámbrica a través de la red, lo que facilita el monitoreo remoto y la toma de decisiones informadas (Sanjeevi et al., 2020).

En el contexto agrícola, los protocolos de comunicación deben ser diseñados para optimizar el consumo de energía de los nodos sensores (Abella et al., 2019) y garantizar una transmisión de datos confiable a largas distancias. Algunos protocolos comúnmente utilizados son LoRaWAN, SigFox y NB-IoT (Hong et al., 2023). Por lo que, el tema del internet de las cosas (IoT) aún se encuentra en fase de exploración en diversas aplicaciones de tecnología en campos como las comunicaciones, servicios de soporte captación de datos de difícil acceso y condiciones hostiles (Kavitha et al., 2022). Las comunicaciones inalámbricas representan la base de la conectividad de las redes inalámbricas de sensores (Aral et al., 2022). Las topologías de red más comunes en las WSN agrícolas son estrella y árbol (De Carvalho Silva et al., 2017) y los nodos de sensores utilizados en el ámbito agrícola son diseñados para resistir condiciones ambientales adversas y contar con una fuente de alimentación eficiente (Abella et al., 2019), en este sentido, las plataformas más utilizadas en WSN agrícolas son Arduino, Raspberry Pi y ESP32, por su bajo costo, facilidad de programación y compatibilidad con una amplia variedad de sensores y módulos de comunicación (Tian et al., 2019; Al-Qurabat & Abdulzahra, 2020). La tecnología LoRa en las WSN agrícolas es elegido debido a su capacidad para cubrir grandes distancias con un bajo consumo de energía a diferencia de otras que usan SigFox y NB-IoT (Hong et al., 2023)

El estándar usado en la intercomunicación en computadoras es el modelo OSI que consiste en dividir un sistema de comunicación en siete capas abstractas, agrupada en función de sus objetivos y funciones (Hong et al., 2023), donde sus interfaces posibilitan la implementación de desarrollos internos y modificaciones en los protocolos de las capas (Stergiou et al., 2004). Las WSN se enfoca en la disposición de diversos nodos separados geográficamente interconectados entre sí, trabajando de manera colectiva en un fin común, recopilando datos y compartiéndolos dentro de la red, presentando flexibilidad operativa para formar estructuras de red reconfigurables adaptadas a los requisitos de la aplicación (Begum & Nandury, 2023).

La operación clave de una WSN es el medio de comunicación establecido que optimiza el consumo de energía de los componentes de hardware de cada nodo (Sunhare & Chattopadhyay, 2023) con características de disponibilidad y velocidad en función de optimización y eficiencia energética

ISSN: 2992-8338

(Almajed et al., 2019). En términos de los nodos, un nodo GateWayNode consta de microcontrolador, transceptor, sensor, módulo de carga y batería, panel solar, antena de transmisión – recepción con sensor integrado de temperatura, antena GPS y antena Wifi integrada (Sanjeevi et al., 2020). En caso del SensorNode adicionalmente incluyen sensores de temperatura, humedad y nivel de agua. La configuración topológica de la red es tipo estrella (Carvalho et al., 2017), en la que cada nodo sensor incluido en la WSN se conecta directamente al GatewayNode para transmitir la información hacia la nube (Ahmad et al., 2019).

En el ecosistema de comunicación existen componentes de servicio en las capas: 5 (sesión), 6 (presentación) y 7 (aplicación), las API's disponen de End Point para el consumo de servicios tanto para recibir información como para entregarla desde las aplicaciones de escritorio, web o móviles (Andrianto et al., 2023) y en los servidores de las API's se ejecutan procesos de Back End, validando información previa a la inserción en la base de datos en la nube (Davcev et al., 2018).

El almacenamiento de los datos de los nodos se encuentra en una base de datos relacional, disponible como un servicio en la nube de internet, y se encuentra siempre disponible en el GatewayNode conectado a la red. Igualmente, dispone de funcionalidades adicionales como elasticidad, balanceo de carga, minimización de la latencia del servicio, redundancia, recuperación de fallas y respaldos automatizados (Talavera et al., 2017).

La capa 7 (aplicación) del modelo OSI ejecuta el Front End, que proporciona el medio de acceso para la consulta de los datos almacenado en la base de datos de la nube. En la capa superior se encuentran las aplicaciones para dispositivos móviles que permiten, además de la consulta de datos, el poder enviar información de vuelta hacia los nodos, es decir, para solicitar información adicional o ejecutar pequeños programas dentro del nodo (Sanjeevi et al., 2020) para mejorar el desempeño o revisión de posibles fallas en su funcionamiento interno (Begum & Nandury, 2023)

El medio de prueba del funcionamiento de los nodos es propuesta generando diversas instancias programadas en el entorno y analizando el funcionamiento como en (Chu et al., 2023). En lo casos de pruebas físicas en (Tian et al., 2019) presenta casos como ropa, microcontroladores y pequeñas redes WSM. Sin embargo, en (Abella et al., 2019) presenta un nodo WSN de cuatro subsistemas funcionales: energía, sensores, control y comunicación, encargadas de recolectar, almacenar y gestionar la energía. Una de las aplicaciones relevantes es reportada en (Al-Qurabat & Abdulzahra, 2020) que monitorea el medio ambiente basada en Periodic Wireless Sensor Network (PWSN) llamada «Red Automática de Monitorización Medioambiental de Georgia (GAEMN)», destinada a monitorizar los atributos meteorológicos y otra en (Andrianto et al., 2023) en el monitoreo de variables críticas en la agricultura. Este último usa tecnología para identificar las deficiencias de nutrientes en las plantas y proporcionar recomendaciones acerca de fertilizantes.

La aplicación de las WSN en la agricultura como en (Cambra et al., 2017) refiere a que el conocimiento del agricultor en el uso de la tecnología, conduce a una agricultura y un proceso de cultivo innovador y de precisión. Por lo que, en agricultura y ganadería es esencial un sistema de gestión de datos a través de IoT con almacenamiento en la nube, lo cual incrementa la productividad agrícola y beneficios económicos, impactando en un ambiente monitoreado (Sendra et al., 2020).

Una de las ventajas de monitoreo ambiental en zonas rurales es que cada año existen reportes de incendios forestales debido a las condiciones ambientales de sequía, errores humanos y debido a los cambios climáticos. Esta situación hace que los sistemas de monitoreo IoT adquieran mayor relevancia en los últimos años proponiendo diseños de estrategias eficientes de agrupación de sensores para reducir el consumo de energía por transmisión de datos en toda la WSN. En este contexto, la conservación de la energía debe garantizarse en función de la no uniformidad de la distribución de sensores resultante en las distintas zonas de la red y bajo diferentes condiciones ambientales.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El artículo propone dos diferentes dispositivos de intercomunicación en la red WSN requeridos para captar las variables climáticas y agrícolas en el campo. Las variables captadas son temperatura y humedad, nivel de agua y datos adicionales como la geolocalización, la temperatura interna, identificador del dispositivo que obtuvo las lecturas e identificador del dispositivo que recibe la información, a través de la utilización de la topología de red estrella.

3.1 UBICACIÓN ESPACIAL

El sitio experimental esta ubicada en los alrededores de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero, puesto que la orografía solo permite realizar el montaje de nodos con línea de vista a grandes distancias en ubicaciones rurales, minimizando la distorsión de la señal de la red, a continuación, en la figura 1 se muestra la vista del terreno en curvas de nivel del área geográfica.



Figura 1. Vista del área geográfica.

ISSN: 2992-8338

3.2 HARDWARE

El desarrollo del WSN de largo alcance para monitoreo de variables agrícolas y ambientales hace uso de Arduino UNO que trabaja en condiciones de temperatura de -40°C a 85°C y a través de sus periféricos con conectados los sensores y la antena lora. Las antenas Lora REYAX RYLR993 Lyte están equipadas con una interfaz de comandos UART compatible con los entornos de microcontroladores como Arduino. Los comandos AT permiten la configuración de los datos de operación del transmisor, tales como los baudios, la cantidad de bits del paquete de datos, la paridad, el bit de parada, el identificador de la red LoraWan, el identificador único del dispositivo, la sesión de red, la frecuencia de la banda de transmisión y la clase de la tecnología Lora.

Los componentes de hardware del WSN son:

1) Tarjeta ESP32-WROOM-32.
2) Antena LoRa RYLR998
3) Panel solar PS-815
4) GPS u-blox 6
5) Sensor de temperatura
6) Sensor de humedad y temperatura
7) Sensor de nivel de agua
8) Conector de la consola
9) Batería de respaldo

En el caso del GPS, es un sensor tipo antena con capacidad de detección de 66 satélites de forma simultánea, actualización de lecturas desde 1 Hz hasta 10 Hz, bajo consumo de energía y recepción en ciudades y caminos con follaje denso. Su rango de operación va desde -515 hasta 18,000 msnm, es alimentado con 3V hasta 5.25V a 2 mAh, con rango de operación de temperatura de -30 °C a +85 °C. La forma de conexión es como se muestra en la figura 2.

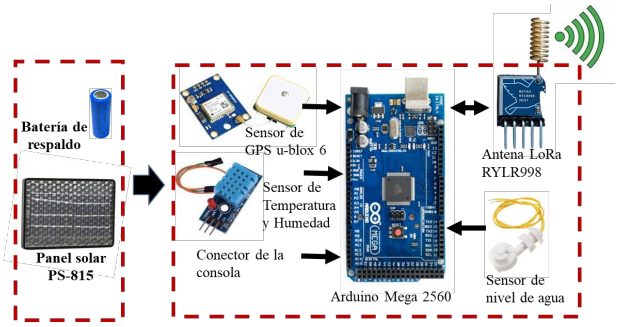


Figura 2. Elementos del SensorNode.

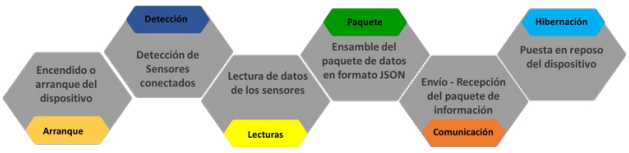


Figura 3. Funcionamiento interno del SensorNode.

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 identifica la eficiencia de la combinación de tecnologías WiFi-Lora utilizada como puente de información inicialmente transmitida mediante LoRa y enviándola posteriormente hacia internet vía WiFi.

En la figura 3 se presenta la vista de la topología de red estrella de la WSN en la cual se muestran los elementos de la red y del ecosistema de aplicaciones que permiten la recepción, almacenamiento y consulta de datos recabados por los sensores.

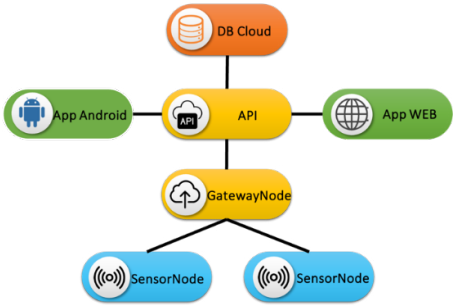


Figura 4. Elementos de la WSN, middleware y software.

En el Firmware se codificó un programa en lenguaje C y C++ que ejecutado en el microcontrolador para la obtención de las lecturas de los sensores conectados. Las lecturas se digitalizan, cuando es requerido, se forma el paquete de datos en formato JSON incluyendo las lecturas, y son transmitidas inalámbricamente de forma automática hacia la base de datos en la nube mediante el nodo que dispone de acceso a internet.

Los requisitos fundamentales del diseño de los nodos incluyen dispositivos electrónicos de bajo consumo energético, uso de energías sostenibles para su funcionamiento, capacidad de operación de 24 horas al día, diseño que posibilita su instalación en medios rurales sin acceso a energía eléctrica e internet, capacidad de operación de 24 horas al día, diseño que posibilita su instalación en medios rurales sin acceso a energía eléctrica e internet, diseño que posibilita su instalación en medios rurales sin acceso.

3.3 MIDLEWARE

El Midleware es el componente intermedio entre los dispositivos GatewayNode, de la base de datos y la plataforma de consulta o entre la base de datos y las aplicaciones móviles. El API de servicio, 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, la cual es desarrollada en Framework Laravel v8.83.27 para internet con núcleo desarrollado en leguaje PHP v8.0.29, donde dispone de métodos de manipulación de datos GET, POST, PUT, DELETE y se utiliza como el estándar para el consumo de servicios web.

3.4 SOFTWARE

El grupo de componentes externos a los nodos de la WSN, es el software, middleware y la nube. La base de datos relacional

ISSN: 2992-8338

desarrollada en MariaDB, almacenada en un Servidor virtual privado en una infraestructura de nube, la cual puede localizarse simultáneamente en uno o varios servidores de la infraestructura. Esa base de datos solo permite los accesos desde una ubicación específica, que comúnmente es la dirección IP de la API de servicio, logrando así la seguridad en el acceso a los datos. En la plataforma WEB es utilizada para la consulta y visualización de datos generados desde los dispositivos SensorNode, realizado en Framework Angular v11.0.2 y programado con el lenguaje de programación TypeScript. La App Android es la aplicación móvil enlazada a los datos almacenados de los SensorNode's mediante la consulta de la API de servicio, desarrollada mediante el convertidor IONIC de aplicaciones basadas en tecnología Angular.

4. RESULTADOS

La validación de la propuesta del WSN presenta resultados satisfactorios en la integración de componentes de hardware como software, logrando que los nodos se energicen con paneles solares, y de esta forma sean fuente de energía para los sensores conectados para la obtención de lecturas, la construcción del paquete de información en formato JSON y el envío mediante la antena LoRa desde los nodos de sensores al nodo conectado a internet. Se logró también el consumo de la API de servicio para envío de información, el almacenamiento desde la API hacia la base de datos y la consulta de los datos almacenados por medio de una aplicación WEB y una App Android.

La planeación de las ubicaciones, se realizaron utilizando un portal para cálculo de enlaces de radiofrecuencia. Tomando en consideración los requisitos de transmisión del fabricante: la distancia menor a 10 kilómetros, línea de vista entre las antenas de transmisión – recepción, la localización en áreas poca o baja contaminación de radiofrecuencia. Con esos requisitos se consideraron las ubicaciones para la colocación de los nodos en campo pre ubicados en localidades alrededor de Chilpancingo y carreteras a ciudades cercanas.

La red propuesta incluyó dos nodos SensorNode y un nodo GatewayNode, tal como se observa en la figura 5. La prueba funcional de los nodos en las ubicaciones predefinidas es satisfactoria, logrando la comunicación. Sin embargo, en campo, se observó que había posibilidad de reubicar los nodos y posiblemente lograr los enlaces de comunicación.

Las coordenadas de las ubicaciones de los nodos de la WSN son:

GatewayNode: 17.4758, -99.53002
SensorNode 1: 17.5521, -99.46115
SensorNode 2: 17.5778, -99.48777

Posteriormente, al efectuar pruebas de conectividad en localidades foráneas a la ciudad, se logró un enlace de dos nodos al GatewayNode, mostrados en la imagen de la figura 5. 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. Observando que mientras se cumpla con la línea de vista entre los dispositivos, se logra la conectividad bidireccional. Logrando establecer el funcionamiento de la red inicialmente de unos minutos, hasta alcanzar 7 horas ininterrumpidas de funcionamiento.

La conectividad entre el GatewayNode y el SensorNode 1 en el tramo "Llanos de tepoxtepec – Carretera a Tixtla" se efectuó la transmisión de los datos a una distancia de 11.3 Km, tal como se observa en la imagen de la figura 5.

La conectividad entre el GatewayNode y el SensorNode 2 en el tramo "Llanos de tepoxtepec – Carretera a Zumpango" se efectuó la transmisión de los datos a una distancia de 12.23 Km, tal como se observa en la imagen de la figura 6.

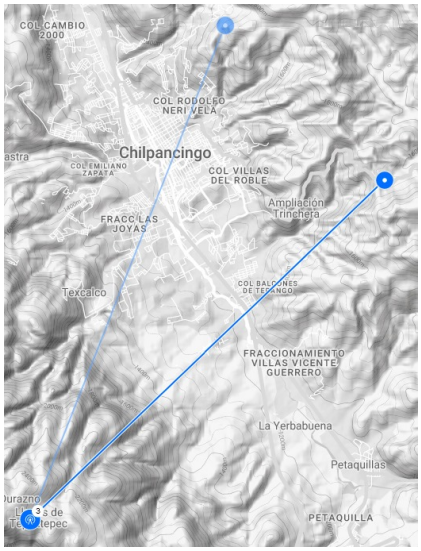


Figura 5. Red WSN implementada.

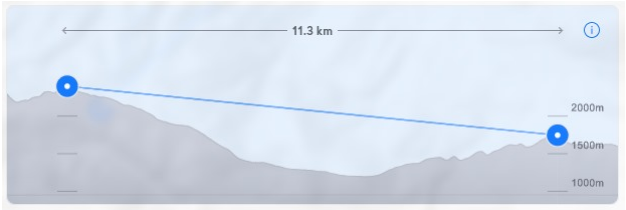


Figura 6. Enlace GatewayNode y SensorNode 1.

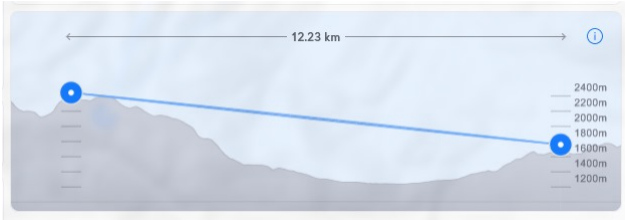


Figura 7. Enlace GatewayNode y SensorNode 2.

5. CONCLUSIONES

La investigación sugiere que las distancias de conectividad pueden mejorarse dependiendo el lugar de ubicación de los nodos en un campo agrícola y la ubicación más alta es la ideal para el nodo central, conectado a internet.

El paquete de datos entre los nodos puede tener modificaciones dependiendo de las necesidades del

ISSN: 2992-8338

proyecto de monitoreo o los sensores conectados. Los tipos de sensores en cada nodo pueden ser modificables de tal forma que pueden generarse nodos especializados para monitoreo de clima, agua, nutrientes, estado de salud de plantas, entre otros.

En investigaciones futuras se recomienda disponer de una mayor cantidad de nodos dentro de la WSN con diversos sensores conectados a cada nodo, envíos de datos programados a intervalos de tiempo de envíos diferenciados, según la información se vaya actualizando en los nodos sensores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abella, C. S., Bonina, S., Cucuccio, A., D'Angelo, S., Giustolisi, G., Grasso, A. D., Imbruglia, A., Mauro, G. S., Nastasi, G. A. M., Palumbo, G., Pennisi, S., Sorbello, G., & Scuderi, A. (2019). Autonomous Energy-Efficient Wireless Sensor Network Platform for Home/Office Automation. *IEEE Sensors Journal*, *19*(9). https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2892604

Ahmad, N., Hussain, A., Ullah, I., & Zaidi, B. H. (2019). *IOT based Wireless Sensor Network for Precision Agriculture*.

Almajed, H. N., Almogren, A. S., & Altameem, A. (2019). A resilient smart body sensor network through pyramid interconnection. *IEEE Access*, *7*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909557

Al-Qurabat, A. K. M., & Abdulzahra, S. A. (2020). An Overview of Periodic Wireless Sensor Networks to the Internet of Things. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *928*(3). https://doi.org/10.1088/1757-899X/928/3/032055

Andrianto, H., Suhardi, Faizal, A., Budi Kurniawan, N., & Praja Purwa Aji, D. (2023). Performance evaluation of IoT-based service system for monitoring nutritional deficiencies in plants. *Information Processing in Agriculture*, *10*(1). https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.10.001

Aral, A., De Maio, V., & Brandic, I. (2022). ARES: Reliable and Sustainable Edge Provisioning for Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, *7*(4). https://doi.org/10.1109/TSUSC.2021.3049850

Begum, B. A., & Nandury, S. V. (2023). Data aggregation protocols for WSN and IoT applications – A comprehensive survey. In *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* (Vol. 35, Issue 2). https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.01.008

Cambra, C., Sendra, S., Lloret, J., & Garcia, L. (2017). An IoT service-oriented system for agriculture monitoring. *IEEE International Conference on Communications*. https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996640

Carvalho, J., 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*. https://www.researchgate.net/publication/318866065

Chu, Y., Mitchell, P., Grace, D., Roberts, J., White, D., & Mickus, T. (2023). IRIS: A low duty cycle cross-layer protocol for long-range wireless sensor networks with low power budget. *Computer Networks*, *225*. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109666

Davcev, D., Mitreski, K., Trajkovic, S., Nikolovski, V., & Koteli, N. (2018). IoT agriculture system based on LoRaWAN. *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS*, *2018-June*. https://doi.org/10.1109/WFCS.2018.8402368

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. *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science, SpliTech 2017*.

Hong, S., Yao, F., Zhang, F., Ding, Y., & Yang, S. H. (2023). LPWC: Long preamble wake-up communication protocol for a LoRa network. *Internet of Things (Netherlands)*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100787

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*. https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100563

Sanjeevi, P., Prasanna, S., Siva Kumar, B., Gunasekaran, G., Alagiri, I., & Vijay Anand, R. (2020). Precision agriculture and farming using Internet of Things based on wireless sensor network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, *31*(12). https://doi.org/10.1002/ett.3978

Sendra, S., García, L., Lloret, J., Bosch, I., & Vega-Rodríguez, R. (2020). LoRaWAN network for fire monitoring in rural environments. *Electronics (Switzerland)*, *9*(3). https://doi.org/10.3390/electronics9030531

Stergiou, T., Leeson, M. S., & Green, R. J. (2004). An alternative architectural framework to the OSI security model. *Computers and Security*, *23*(2). https://doi.org/10.1016/j.cose.2003.09.001

Sunhare, P., & Chattopadhyay, M. K. (2023). Cache controlled cluster networking protocol. *International Journal of Intelligent Networks*, *4*. https://doi.org/10.1016/j.ijin.2023.07.003

Talavera, J. M., Tobón, L. E., Gómez, J. A., Culman, M. A., Aranda, J. M., Parra, D. T., Quiroz, L. A., Hoyos, A., & Garreta, L. E. (2017). Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 142). https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.015

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). https://doi.org/10.1038/s41928-019-0257-7



SOBERANÍA EN SALUD

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Review on Serious Games for Ankle Rehabilitation

O. I. Cirilo Piñon*, A. Blanco Ortega*, A. Magadán Salazar*, M. Adam Medina*, R. Campos Amezcua*

** TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca Morelos, México.*

Abstract: When a person suffers from a traumatic injury to the ankle, when carrying out daily activities or sports, serious or permanent damage can be caused, requiring rehabilitation to return to a normal condition. Robotic assistance has emerged thanks to the evolution of technology, allowing smooth and precise movements safely. However, as a long-recovery therapy, patient motivation plays an important role, making the search for concentration alternatives essential to keep the patient focused on therapy. The new advances seek to integrate serious games (2D, 3D video games, or virtual environments) through a control system, according to the assistant robot. This article presents a bibliographic search of the most relevant projects that implement the Ankle Rehabilitation-Serious Game connection. The search has been limited to the years 2011-2024. Around 15 systems were found that meet the selection parameters, with have at least one assistant robot and at least one serious game. The use of serious games in ankle rehabilitation improves the patient's concentration and offers a more engaging rehabilitation.

Keywords: ***Serious Game, Ankle rehabilitation, Robotic assistance, Motivation.***

1. INTRODUCCIÓN

El tobillo es una de las partes más importantes del sistema esquelético, debido a que es fundamental para la locomoción del ser humano. Su configuración lo hace vulnerable de sufrir lesiones traumáticas que generen un daño muscular en virtud de soportar el peso del mismo. Por ello, es una de las articulaciones con altos índices de lesión. Los esguinces son considerados como estiramientos inusuales o desgarres en los ligamentos del tobillo que pueden generar daños apenas imperceptibles, pequeñas molestias y en casos graves, daños irreparables si no se tratan a tiempo [1]. Estos pueden ser provocados por actividades cotidianas que involucren caminar, correr o saltar. La clasificación de los esguinces se divide en tres: el grado I es un estiramiento en los ligamentos laterales del tobillo, el grado II es un desgarro pequeño o parcial en uno o más ligamentos y el grado III es la rotura completa de uno, dos o más ligamentos considerando ambos tobillos [2]. La intensidad del dolor causado por un esguince de tobillo muchas veces limita la capacidad de una persona para trabajar o participar en actividades deportivas durante un periodo de tiempo extenso, por lo que, mediante una rehabilitación apropiada, el tobillo puede recuperar su estado normal de manera rápida sin llegar a afectarlo permanentemente.

La rehabilitación es entonces, una agrupación de intervenciones diseñadas para que el individuo regrese a su estado funcional (óptimo) y lo más rápido posible. Esto se logra a través de desempeñar trabajos físicos graduales, que pueden desarrollarse por la misma persona o con la asistencia ya sea humana (mediante médicos especialistas) o robótica (máquinas o robots asistentes), de tal forma que se establezca una rutina de entrenamiento para generar un proceso que permita recuperar las habilidades perdidas debido a una lesión traumática. En la Figura 1 se muestran los cuatro niveles de rehabilitación que dependen de la actividad física que desarrolla el paciente para ser clasificados [3]. La rehabilitación activa se realiza cuando el paciente ejecuta ejercicios de contracción muscular por cuenta propia sin usar fuerzas de oposición. En la rehabilitación pasiva los movimientos son realizados por dispositivos robóticos o un terapeuta profesional, con el objetivo de que el individuo no genere ningún tipo de esfuerzo o contracción muscular. Una combinación de ambos genera una rehabilitación asistida-resistiva (variaciones de la rehabilitación activa), de la cual, la definición es declarada por la cantidad de fuerza de oposición que ofrece el sistema.



Figura 1: Tipos de rehabilitación

1.1 Juegos Serios

La gamificación es definida como en la creación y diseño de videojuegos (juegos serios) con un propósito más allá que el de entretener, dentro de los que está la enseñanza, rehabilitación, etc., [4]. Un ejemplo de ello, lo muestra Ong *et al*, [5] cuyo trabajo ofrece una vista más amplia de los juegos serios como herramientas de rehabilitación donde, los estudios mostrados le dan un énfasis a las funciones primarias motoras,

ISSN: 2992-8338

cognitivas, de equilibrio, entre otras. En consecuencia, se logra demostrar que los resultados de usar un juego-serio en rehabilitación pueden ofrecer distintas respuestas según el sistema utilizado, con la ventaja de que la mayoría tienden a ser positivos. En este aspecto, un juego serio se define como un ejercicio recreativo creado con la finalidad de proveer una herramienta interactiva para desarrollar habilidades nuevas o perdidas, que se centren en mantener entretenido al paciente, buscando motivarlo para que concluya su recuperación satisfactoriamente [6]. A su vez, se ofrece un elemento didáctico que puede ser aplicable en múltiples tipos de rehabilitación. Cabe resaltar que no existe una forma explícita de integrar un juego serio directamente a la rehabilitación de un problema cualesquiera, sino que, por lo general se adapta a través de un control específico o un software inteligente.

Este documento investiga los productos científicos desarrollados referentes al tema robots de servicio y juegos serios. Se evalúan las investigaciones recientes destacando sus características principales, así como sus resultados para ofrecer una alternativa o área de oportunidad futura.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se lleva a cabo una revisión acerca de los sistemas mecatrónicos que fusionan el uso de máquinas/robots asistentes de rehabilitación de tobillo y la aplicación de juegos serios para desarrollar métodos de rehabilitación eficientes que mantengan concentrado al paciente durante todo el proceso de terapia. La búsqueda fue desarrollada en bases de datos con acceso abierto. Partiendo del trabajo de Nazar *et al*., [7], se incluyen investigaciones que datan desde 2011 hasta 2024. Los términos de búsqueda empleados se adaptan a la propuesta de revisión limitándose a *"ankle rehabilitation with serious game", "serious games in rehabilitation", "Virtual Reality and ankle rehabilitation"*, entre otras. Los parámetros de selección se definen a continuación.

1. Uso de máquinas/robots asistentes para rehabilitación de tobillo.
2. Actuadores, sensores y composición mecánica de la máquina/robot asistente.
3. Desarrollo de juego serio con respecto a la composición mecánica del robot asistente.
4. Tipo de juego desarrollado: 2D (dos dimensiones), 3D, AR (Realidad aumentada) o VR (Realidad virtual).
5. Control del sistema de intercomunicación entre el robot asistente y el juego serio.

Se incluyen investigaciones que trabajan tanto con el robot asistente, así como con al menos un juego serio. Otras investigaciones que no cumplan con lo anterior, se descartan para ofrecer un contenido más específico y concentrado.

3. REHABILITADORES DE TOBILLO-JUEGOS SERIOS

Como resultados preliminares se encontraron 13 sistemas que cumplen con los parámetros de selección. Estos cuentan con al menos un robot asistente y al menos un juego serio, videojuego, gamificación o entorno virtual. Así mismo, se agregan dos sistemas adicionales que si bien, no cuentan con máquinas o robots asistentes, aplican el uso de juegos serios en la rehabilitación de tobillo. Para concentrar la información se descartaron las investigaciones que no tuviesen como objetivo la rehabilitación de tobillo. Todos los elementos seleccionados se encuentran registrados y desglosados en la Tabla 1, de los cuales, se menciona que algunos datos se obtuvieron indirectamente por la falta de especificaciones en la documentación.

3.1 Diseño mecánico de las Máquinas/Robots asistentes

El tobillo humano es equiparable a un mecanismo de 3 GDL (grados de libertad), que son clasificados según el movimiento que realiza. Esta clasificación es:

- Abducción/Aducción (movimiento horizontal, externo e interno en el plano sagital).
- Dorsiflexión/Plantarflexión (movimiento vertical, arriba y abajo en el plano transversal).
- Eversión/Inversión (movimientos de rotación interna y externa en el plano frontal).

Los resultados muestran una ligera inclinación por la selección y construcción de mecanismos con un solo grado de libertad [8]–[14], esto es debido a la complejidad de su control y objetivo que pretende resolver cada sistema. En la mayoría de casos, para 1 GDL es común el uso del movimiento Dorsiflexión/Plantarflexión, puesto que es un desplazamiento que realiza cualquier persona, incluso con el simple hecho de caminar. Por ende, este es más fácil de replicar con un robot asistente mediante una estructura similar a la de un pedal de un automóvil o por medio de un exoesqueleto como en el caso de Pino *et al.,* [12]. Tomando esto como punto de partida, existen autores que agregaron 1 GDL adicional para comprender también el movimiento Eversión/Inversión [6], [15], [16]. Este es un movimiento rotacional por lo que es habitual encontrar mecanismos paralelos (para pacientes que se encuentran sentados) o elementos en base a correas y actuadores (para pacientes que se encuentran de pie) que permiten realizar los dos GDL de manera adecuada. Se encuentran algunas excepciones como la investigación presentada por Perez *et al.,* [15], cuya construcción mecánica se basa en actuadores lineales de forma paralela con una forma similar al uso de correas para la rehabilitación de tobillo con pacientes sentados. Para el diseño de elementos con 3 GDL, al ser un número considerable de movimientos, las estructuras pueden variar entre autores. Cioi *et al.,* [17] desarrollaron un mecanismo Rutgers (robot con distintas cadenas cinemáticas) que funciona como un controlador remoto (a distancia) para el tratamiento de rehabilitación en pacientes con esguinces de tobillo o problemas cerebrales. De la misma forma, Gobron *et al.*, [18] diseñaron dos elementos hápticos con 3 GDL cada uno, que se montan a la pared para simular la acción de caminar dentro de un entorno virtual mientras el paciente se encuentra sentado. Finalmente, Covaciu *et al*., [19] diseñaron y construyeron virtualmente un mecanismo de tres GDL en forma de pedal de automóvil, con el que genera pruebas a través de un paciente virtual para probar su controlabilidad en un juego con entornos virtuales.
Todos los sistemas comentados se diseñaron y construyeron en gran medida, con actuadores y sensores. De estos, se destaca

ISSN: 2992-8338

el uso de motores eléctricos y sensores de fuerza. Los motores eléctricos son funcionales por su bajo costo y controlabilidad, además de contar con una gran variedad de tamaños disponibles. Por otro lado, los sensores de fuerza permiten dos funciones principales: 1) definir la intención del paciente según la fuerza que este genere durante su proceso de rehabilitación, logrando un mejor control del robot asistente; y 2) los datos de respuesta en los sensores son utilizados para manipular el juego serio o el personaje principal en el videojuego propuesto por cada autor. Otros tipos de actuadores útiles para este tipo de sistemas, son los actuadores neumáticos o los servomotores (motor con control de posición angular), mientras que, para los sensores existen encoders (codificador rotatorio), sensores inerciales (IMU), sensores musculares, entre otros. Uno de los mayores problemas al usar este tipo de componentes está en el costo de adquisición y la dificultad para implementarlos en una etapa de control, disminuyendo en gran parte, el interés en su utilización u aplicación.

3.2 Diseño de Juegos Serios

El diseño de un juego serio no cuenta con reglas específicas, por el mismo motivo no existe una forma estándar para integrar un videojuego o entorno virtual directamente en la rehabilitación de tobillo. Por lo general, se tiene una máquina/robot a la cual se adapta el videojuego dependiendo de las características y señales otorgadas por esa máquina, así como la idea general del diseñador. En los sistemas revisados con 3 GDL [17]–[19], se observa que, la realización de un juego es complicada por la cantidad de movimientos y señales que se deben manipular. Por ello, se opta por usar entornos virtuales (realidad aumentada "AR" y realidad virtual "VR") en el que el usuario puede navegar sin limitación y por un tiempo indefinido. Para sistemas con 1 y 2 GDL se desarrollan en mayor cantidad, juegos en dos y tres dimensiones donde los movimientos o acciones que puede realizar el personaje principal dependen de la estructura mecánica del sistema. Como ejemplo de ello, Pino *et al.,* [13] crearon un juego 3D donde un avión de papel tiene que pasar por el centro de diferentes anillos a lo largo del juego. Para cambiar el comportamiento del avión se usa un movimiento específico del tobillo y se acciona el robot asistente de la siguiente manera: dorsiflexión (para que el avión se eleve) y plantarflexión (para que el avión descienda).
Como punto de interés, se descubre que, para los dispositivos con 2 GDL, solo el trabajo de Pasqual *et al*., [16] cuenta con un juego serio en el que usan los dos GDL de manera simultánea, mientras que en los demás se presenta el uso de un grado de libertad por vez o por acción, es decir, es necesario terminar la ejecución de un movimiento para continuar con otro. Además, el motor de diseño gráfico usada por excelencia en la mayor cantidad de trabajos es Unity (programa multiplataforma te acceso gratuito-restringido), el cual permite crear proyectos 2D y 3D, lo que lo hace ideal para proyectos iniciales o experimentales.

3.2.1 Dificultad de jugabilidad en Juegos Serios

La dificultad del juego serio también es definida por el diseñador y esta puede ser con base en niveles, puntos obtenidos, distancia recorrida o incluso por el desempeño del usuario al jugar. En la Tabla 1 se describe la dificultad del juego para cada autor usando los términos: fácil a difícil, ajustable y adaptativa, para una mejor comprensión. La primera se refiere al aumento de dificultad después de sobrepasar una meta (nivel, distancia o puntos). El término ajustable se refiere a los juegos donde se puede medir la fuerza muscular o rango de movimiento del paciente mediante el robot asistente y, de esta manera, el operador puede modificar la dificultad del videojuego [10]. Cuando el robot asistente mide el desempeño del paciente durante la terapia y cambia la dificultad del juego automáticamente, se dice que es adaptativa [11] y [15].

3.3 Control e intercomunicación Robot - Juego Serio

El tipo de control para los rehabilitadores de tobillo es diferente para cada sistema presentado, donde es necesario controlar la posición y fuerza del robot, así como rigidez, inercia y amortiguación en algunos casos. Añadiendo las perturbaciones o señales que pueden generarse de elementos externos (como el juego serio), se tiene el deber de buscar un sistema de control adecuado. Este deberá tener en cuenta el tipo de rehabilitación que quiere desarrollar. Cuando se habla de programación de trayectorias, por lo general se busca que el usuario no genere fuerza, realizando una rehabilitación de tipo pasiva. De otra manera, si el paciente genera algún tipo de fuerza de oposición al movimiento se considera rehabilitación activa. Salazar *et al*., [6] presentan un ejemplo de ello, usando un rehabilitador de 2 GDL que inicialmente usaba un control proporcional integral derivativo (PID) o un control proporcional integral generalizado (GPI) para ejecutar ejercicios pasivos, no obstante, con la implementación de un control de impedancia, así como de un juego serio, se logró la creación de una rehabilitación de tipo activa/resistiva que modifica la intensidad de la terapia en cada nivel de juego. Como implementación adicional, Salazar *et al*., implementaron un sistema de reconocimiento de expresiones faciales, para determinar cuándo el usuario está concentrado o no en la terapia, o cuándo presenta dolor/molestia, y con esta información, modificar el nivel del juego.
En los últimos años creció el concepto "control de impedancia" como un método que permite la interacción humano-robot, permitiendo un dominio de la fuerza o velocidad desde un punto de contacto [10]. Esto generó una aplicación efectiva en máquinas y mecanismos (comerciales y no comerciales) desde el enfoque de la robótica de asistencia.
Otro ejemplo de ello está en el trabajo de Humberto *et al*., [9], quienes presentan "Tobibot" un rehabilitador de tobillo de 1 GDL enfocado en el movimiento dorsi/plantarflexión, con dos tipos de controles: un control tipo PID para el seguimiento de trayectorias en ejercicios pasivos y un control de impedancia que manipula posición-fuerza en el efector final del rehabilitador para fuerzas proporcionadas por el paciente mediante contacto físico (para rehabilitación activa/resistiva). En ese sentido, existe la posibilidad de usar diferentes controles para una misma terapia. Ren *et al.,* [11] usan un dispositivo montado en el tobillo del paciente donde se realizan movimientos pasivos de estiramiento y mediante un control inteligente, en la fase de entrenamiento los movimientos se convierten en activos con resistencia robótica que se adapta al desempeño del paciente. También existen

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024

Tabla 1. Investigaciones con la relación Máquinas/Robots de rehabilitación de tobillo-Juegos Serios

Autor/es	Año de publicación	Tipo de rehabilitación u objetivo.	GDL	Actuadores	Sensores	Tipos de mov.	Tipo de Control	Juego serio	Tipo de juego	Motor de desarrollo del juego serio	Dificultad del juego	Características del juego serio
Cioi *et al.*, [17]	(2011)	Tobillo (para niños con epilepsia).	3	Neumáticos (Mecanismo Steward)	-	DP, EI, AA	Inteligente con procesador Intel Pentium	SI	AR	Java 3D API	Fácil a difícil	Juego de aviación en un escenario de realidad virtual.
Roy *et al.*, [8]	(2011)	Tobillo (pacientes post-ictus)	1	Eléctrico (motor)	Sensores de Fuerza	DP	Impedancias	SI	V2D	N/E	Fácil a difícil	Un objeto pasa entre una diana que cambia su posición según el nivel.
Humberto *et al.,* [9]	(2014)	Tobillo Activa/Pasiva	1	Eléctrico (motor)	Sensores de fuerza	DP	PID / Impedancias	NO	V2D	N/E	Ajustable	Implementación de juegos online gratuitos donde la movilidad se hace desde "Labview".
Goncalves *et al.,* [10]	(2014)	Tobillo (pacientes post-ictus)	1	Eléctrico (motor)	Sensores de Fuerza	DP	Impedancias	SI	V2D	RobRehab framework	Ajustable	Se crearon dos juegos serios, uno para medir la fuerza muscular y otro para medir el rango de movimiento.
Perez *et al.*, [15]	(2015)	Tobillo-activa	2	Eléctricos (motores)	N/E	DP, EI	Impedancias	SI	V2D	N/E	Adaptativa	Videojuego que adapta su dificultad con el desempeño del paciente.
Gobron *et al.*, [18]	(2015)	Piernas (Tobillo-activa)	6	Eléctricos (motores)	Sensores de Fuerza y Torque	DP, AA, EI	Admitancias	SI	VR	Unity	N/E	A través de controles hápticos y un visor, el usuario puede navegar en un ambiente de realidad virtual.
Pasqual *et al.*, [16]	(2016)	Tobillo-activa	2	Eléctricos (motores)	Encoders	DP, EI	Algoritmo programado en lenguaje C#	SI	V3D	Unity	Ajustable	Es usado el juego Doublepong creado por Interactive Motion Technologies (IMT).
Ren *et al.*, [11]	(2017)	Tobillo (pacientes con ictus agudo)	1	Eléctrico (motor)	Sensor de fuerza y encoder	DP	Control inteligente	SI	V2D	N/E	Adaptativa	El sistema cuenta con juegos interactivos útiles para mantener centrado al paciente en su terapia.
Salazar *et al.*, [6]	(2018)	Tobillo Activa/Pasiva	2	Eléctricos (motores)	Sensores de Fuerza	DP, EI	PID/ GPI	SI	V2D	Unity	Fácil a difícil	Se desarrolló un juego con tres niveles donde la intensidad de la terapia incrementa según el nivel.
Pino *et al.*, [12]	(2020)	Tobillo-activa	1	Eléctrico (Servomotor)	Sensores inerciales (IMU)	DP	N/E	SI	V2D	Unity	Ajustable	El juego cuenta con una fase de calibración que evalúa la intención del usuario y ajusta su dificultad.
Covaciu *et al.*, [19]	(2021)	Tobillo (post-ictus)	3	Eléctricos (Servomotores)	Sensor muscular	DP, AA, EI	N/E	NO	VR	Unity	N/E	Tanto el juego como el rehabilitador se crearon vía realidad virtual.
Ferreira *et al.*, [20]	(2021)	Pie (para niños con pie zambo)	-	-	Acelerómetro	DP	Tarjeta controladora	SI	V2D	Unity	Fácil a difícil/ Ajustable	El juego cuenta con seis fases que proporcionan información a los especialistas que llevan la terapia.
Pino *et al.*, [13]	(2022)	Tobillo-activa	1	Eléctrico (motor)	Sensores inerciales (IMU)	DP	Estrategia de control basada en MRT	SI	V3D	Unity	Fácil a difícil	Se guía la trayectoria de un avión a través de unos anillos usando los movimientos establecidos.
Tran *et al.*, [14]	(2023)	Tobillo-activa	1	Eléctrico (motor)	Encoder	DP	N/E	SI	V2D/ V3D	Unity	Fácil a difícil	Se diseñaron dos juegos serios, así como una app móvil de entrenamiento.
Galli *et al.*, [21]	(2023)	Tobillo-activa	-	-	Sensores de mov /ambiental	DP, EI y combinaciones.	Sensor Metamotion	SI	V3D	Unity	Fácil a difícil	Juego con niveles donde el usuario elige un modo de juego (con 1 o 2 GDL) y ejecuta los movimientos.

*Dorsi/Plantarflexión – DP, Eversión/Inversión – EI, Abducción/Aducción – AA. *Realidad virtual-VR, Realidad aumentada-AR, Videojuego en 2D-V2D, Videojuego en 3D- V3D
*No especifica-N/E

ISSN: 2992-8338

ISSN: 2992-8338

controles adaptativos que calculan desde el inicio la asistencia que debe implementar el robot o máquina, a través de movimientos de prueba en la que el control principal (en este caso, control de impedancia) establece la rigidez del mismo, por lo que el nivel del juego serio se compensará en relación al desempeño del paciente como lo establecen en las investigaciones redactadas por Perez *et al*., [15] y Pasqual *et al.*, [16]. Para mecanismos con más de 2 GDL un control de impedancia se vuelve una modificación compleja de realizar, por lo que la documentación obtenida, redacta la opción de algunos autores por preferir otros métodos de control. Entre estos está el uso de elementos inteligentes con procesadores como Intel [17], hasta algoritmos inteligentes programados en lenguaje #C o controles de admitancia [18], que a diferencia de los controles de impedancia, estos son caracterizados por la ausencia de oposición al movimiento.

3.4 Alternativas de implementación

Se estudiaron dos trabajos adicionales que no cuentan con el uso de máquinas o robots, pero se enfocan directamente en el mejoramiento y rehabilitación del tobillo. Ferreira *et al*.,[20] presentan un sistema que utiliza una sandalia convencional, integrada con acelerómetros y una tarjeta controladora (Arduino), la cual permite jugar un Juego Serio de 6 etapas que proporcionan información para un especialista clínico. La dificultad del juego cambia gradualmente o se puede ajustar dependiendo al desempeño mostrado por el paciente. Por otro lado, Galli *et al*., [21] involucran el uso de sensores ambientales y sensores de movimiento que determinan el comportamiento del usuario en cualquier parte en que se instalen, así como los ejercicios que ejecuta (para movimientos dorsiflexión - plantarflexión, eversión - inversión y combinaciones), los cuales que son visibles a través de juegos serios diseñados por los mismo autores.
Estos proyectos dan una perspectiva acerca de las metodologías modernas de rehabilitación de tobillo que si bien, obligan al usuario a realizar y ejecutar ejercicios que pueden mejorar el estado actual del tobillo, no pueden asegurar una correcta ejecución de ellos. Por ende, este tipo de terapia puede ser funcional solo para las etapas finales de la rehabilitación de tobillo, cuando el riesgo de dañar algún musculo o ligamento es bajo, sin embargo, no es opción para una rehabilitación completa.

4. DISCUSIÓN

Después del estudio desarrollado con los sistemas presentados en la Tabla 1, queda entendido que la rehabilitación de extremidades (específicamente en tobillos) puede estar respaldada por el desarrollo de un juego serio que utilice los elementos e información del robot asistente de rehabilitación utilizado (datos de sensores y actuadores) para implementar una terapia más amigable y entretenida con el usuario, que lo mantenga concentrado durante todo el proceso de terapia sin perder la precisión de movimientos que el robot puede ofrecer.
En los artículos y publicaciones seleccionados, se encuentra poca o nula información acerca de los proyectos que trabajan con máquinas/robots de 2GDL para movimientos dorsi/plantarflexión y aducción/abducción, así como su interacción en tiempo real con un juego serio. Además, desde la perspectiva del control interactivo, existen múltiples propuestas que trabajan con un control de impedancias debido a la flexibilidad que esta puede generar. Sin embargo, la mayoría están estipuladas para manipular solo 1GDL, dejando espacio para explorar sistemas con más grados. Entre los actuadores y sensores con más apariciones, están los motores eléctricos, así como los sensores de presión (o empuje), cuya función puede facilitar la obtención de datos característicos como posición y fuerza, esenciales para un control adecuado, así como funcionales para el control de jugabilidad en un juego serio. En relación a ello, la elección de las características del videojuego es libre, es decir, no existen reglas específicas en su desarrollo, puesto que se toma como punto de partida los movimientos que se quieren controlar en el robot asistente, mientras que el diseño visual del juego depende del creador. Este puede basarse en función de un rango de edad, a un público específico, ideas preestablecidas o ideas nuevas. Entre los motores de diseño para juegos serios, se observa una similitud en la aplicación del motor gráfico Unity, el cual es un programa fácil de usar, adaptable a multiplataformas y permite crear proyectos tanto en 2D como 3D, lo que lo hace ideal para usuarios nuevos que buscan desarrollar proyectos estudiantiles, iniciales o experimentales.
Con respecto al control que sincroniza a un robot con un juego serio, se pueden identificar algunas estrategias de control de impedancia. Esto ya que es un tipo de control comúnmente usado en máquinas de rehabilitación de extremidades inferiores, por su utilidad en el ajuste de asistencia dada. Los parámetros que puede controlar en impedancias son: la rigidez, la inercia y la amortiguación, así como la posición y fuerza de un mecanismo. Su gran adaptabilidad permite que otros tipos de controles (PD, PID, GPI) puedan ser implementados para una rehabilitación más completa.

Un área de oportunidad potencial está en el desarrollo o utilización de rehabilitadores de 2 GDL que usen combinaciones diferentes a los movimientos dorsiflexión – plantarflexión y eversión - inversión. En cierto punto, los robots asistentes que involucran movimientos dorsiflexión/plantarflexión - abducción/aducción son los menos habituales y, por ende, son una gran opción para su desarrollo. Además, la aplicación de juegos serios para mecanismos con 2 GDL que utilicen los dos movimientos de manera simultánea se ha explorado poco, ofreciendo una cantidad baja de investigaciones al respecto. De la misma manera, son pocos los juegos serios para 2 GDL desarrollados en tercera dimensión o con personajes en tercera persona que, además, agreguen niveles de jugabilidad. También se menciona que el uso de un control de impedancia para rehabilitadores de tobillo con los mismos GDL o más, son circunstancias con resultados aceptables pero escasos. Bajo esa misma perspectiva, se menciona que el número de proyectos que desarrollan pruebas con pacientes con lesión en algún tobillo es muy pequeño; siendo más los casos donde las pruebas se desarrollan con personas sanas. Esto se debe a la complejidad y delicadeza que se requiere en el manejo de extremidades lesionadas, un seguimiento y monitoreo del proceso de recuperación. A través de la información documentada en esta revisión se pretende otorgar las bases que podrían ayudar a la creación un sistema con una configuración diferente a las establecidas en la Tabla 1 del presente trabajo.

ISSN: 2992-8338

En conclusión, la fusión entre máquinas o robots de rehabilitación de tobillos y juegos serios, pueden generar un sistema entretenido que mantenga concentrado al paciente desde el inicio de su terapia hasta el final de ella. Esto se puede realizar mediante una ley o estrategia de control adecuada que mantenga la sincronización entra ambas partes. De la misma forma, un reto en la aplicación de un juego serio, está en hacer que el videojuego realmente sea entretenido y llamativo para el paciente, de modo que se obtenga como respuesta una rehabilitación adecuada, segura e interesante para cualquier persona o para un rango específico de edad.

5. REFERENCIAS

[1] L. Chinn and J. Hertel, "Rehabilitation of Ankle and Foot Injuries in Athletes," *Clin. Sports Med.*, vol. 29, no. 1, pp. 157–167, 2010, doi: 10.1016/j.csm.2009.09.006.

[2] E. T. Chen, K. C. McInnis, and J. Borg-Stein, "Ankle Sprains: Evaluation, Rehabilitation, and Prevention," *Curr. Sports Med. Rep.*, vol. 18, no. 6, pp. 217–223, 2019.

[3] W. c, L. Vela, A. Blanco, J. Gonzales, and M. Oliver, "Major Trends in the Development of Ankle Rehabilitation Devices," *Dyna*, vol. 176, pp. 45–55, 2012.

[4] A. A. Tori, R. Tori, and F. D. L. D. S. Nunes, "Serious Game Design in Health Education: A Systematic Review," *IEEE Trans. Learn. Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 827–846, 2022, doi: 10.1109/TLT.2022.3200583.

[5] D. S. M. Ong, M. Z. Weibin, and R. Vallabhajosyula, "Serious games as rehabilitation tools in neurological conditions: A comprehensive review," *Technol. Heal. Care*, vol. 29, no. 1, pp. 15–31, 2021, doi: 10.3233/THC-202333.

[6] A. M. Salazar, A. B. Ortega, K. G. Velasco, and A. A. Pliego, "Mechatronic integral ankle rehabilitation system: Ankle rehabilitation robot, serious game, and facial expression recognition system," *Adv. Top. Comput. Vision, Control Robot. Mechatronics*, pp. 291–320, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-77770-2_11.

[7] P. S. Nazar and P. P. Pott, "Ankle Rehabilitation Robotic Systems for domestic use – a systematic review," *Curr. Dir. Biomed. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 65–68, 2022, doi: 10.1515/cdbme-2022-1018.

[8] A. Roy, L. W. Forrester, and R. F. Macko, "Short-term ankle motor performance with ankle robotics training in chronic hemiparetic stroke," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 48, no. 4, pp. 417–430, 2011, doi: 10.1682/JRRD.2010.04.0078.

[9] C. H. Guzmán, J. L. Carrera, and A. Blanco, "Diseño y control de un sistema interactivo para la rehabilitación de tobillo: TobiBot," *Ing. Mecánica. Tecnol. y Desarro.*, vol. 5, no. 1, pp. 255–264, 2014.

[10] A. C. B. F. Gonçalves, W. M. Dos Santos, L. J. Consoni, and A. A. G. Siqueira, "Serious games for assessment and rehabilitation of ankle movements," *SeGAH 2014 - IEEE 3rd Int. Conf. Serious Games Appl. Heal. Books Proc.*, 2014, doi: 10.1109/SeGAH.2014.7067071.

[11] Y. Ren, Y. N. Wu, C. Y. Yang, T. Xu, R. L. Harvey, and L. Q. Zhang, "Developing a Wearable Ankle Rehabilitation Robotic Device for in-Bed Acute Stroke Rehabilitation," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 25, no. 6, pp. 589–596, 2017, doi: 10.1109/TNSRE.2016.2584003.

[12] A. Pino, D. Gomez, M. Múnera, and A. Cifuentes Carlos, "Visual Feedback Strategy Based on Serious Games for Therapy with T-FLEX Ankle Exoskeleton," in *Biosystems and Biorobotics*, vol. 27, 2022, pp. 467–472.

[13] A. Pino *et al.*, "Mirror-Based Robotic Therapy for Ankle Recovery with a Serious Game: A Case Study with a Neurological Patient," *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, vol. 2022-July, 2022, doi: 10.1109/ICORR55369.2022.9896510.

[14] V. Do Tran, T. G. T. Nguyen, and T.-N. Nguyen, "Development of AnkleReHabit - A Low-Cost Robot-Aided Ankle Rehabilitation Platform," *J. Tech. Educ. Sci.*, no. 78A, pp. 33–43, 2023, doi: 10.54644/jte.78a.2023.1359.

[15] J. C. Perez-Ibarra, A. A. G. Siqueira, and H. I. Krebs, "Assist-As-needed ankle rehabilitation based on adaptive impedance control," *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, vol. 2015-Septe, pp. 723–728, 2015, doi: 10.1109/ICORR.2015.7281287.

[16] T. B. Pasqual, G. A. P. Caurin, and A. A. G. Siqueira, "Serious game development for Ankle rehabilitation aiming at user experience," *Proc. IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics*, vol. 2016-July, pp. 1007–1012, 2016, doi: 10.1109/BIOROB.2016.7523762.

[17] D. Cioi, A. Kale, G. Burdea, J. Engsberg, W. Janes, and S. Ross, "Ankle control and strength training for children with cerebral palsy using the Rutgers Ankle CP," *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, pp. 0–5, 2011, doi: 10.1109/ICORR.2011.5975432.

[18] S. C. Gobron *et al.*, "Serious games for rehabilitation using Head-Mounted display and haptic devices," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 9254, pp. 199–219, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-22888-4_15.

[19] F. Covaciu, A. Pisla, and A. E. Iordan, "Development of a virtual reality simulator for an intelligent robotic system used in ankle rehabilitation," *Sensors*, vol. 21, no. 4, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/s21041537.

[20] D. R. Ferreira, C. K. Baptista, B. da S. Rodrigues, B. C. Siqueira, S. M. Blascovi-Assis, and A. G. Corrêa, "Development and Test of a Serious Game for Dorsiflexion and Plantarflexion Exercises of the Feet," *J. Interact. Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 58–68, 2021, doi: 10.5753/jis.2021.1916.

[21] J. Galli *et al.*, "Prevention and Rehabilitation Gaming Support for Ankle Injuries Usable by Semi-Professional Athletes Using Commercial Off-the-Shelf Sensors," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 16, pp. 1–13, 2023, doi: 10.3390/app13169193.

ISSN: 2992-8338

Textile orthosis, design and construction: a solution for grade 1 knee osteoarthritis treatment

M. Acuña-Olivos*, E. Martinez-Rayon*

**Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.*

(e-mail: m22ce069@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: The study focused on designing and manufacturing a knee orthosis aimed at treating grade 1 osteoarthritis, with the objective of slowing its progression. The principles of kinesio taping were integrated using two elastic bands in the orthosis to provide greater support. The proposed design, utilizing exclusively textile materials and an open design, allowed for optimal adaptation to the knee joint anatomy, providing effective support and comfortable alignment. Clo3D software was used to replicate commercial designs and compare them with the design proposed in this study. This methodology proved effective in evaluating the characteristics and functionalities of each model. Clo3D demonstrated its effectiveness in creating and analyzing orthosis models, facilitating a detailed evaluation that provided valuable information for the final knee orthosis design. The orthosis manufacturing process was carried out following specific standards, techniques, and materials, such as Suavenet and Lycra nilon fabric, whose effectiveness was confirmed through textile tests based on ASTM D5034-09. The results of tests conducted with different fabrics corroborated the effectiveness of the textile used in the orthosis, highlighting its ability to provide adequate support without compromising the natural joint mobility, something crucial for treating grade 1 osteoarthritis. The findings of this research suggest that the designed knee orthosis has the potential to positively influence the non-invasive treatment of grade 1 osteoarthritis, offering a comfortable and effective treatment approach.

Keywords: órtesis de rodilla, osteoartritis de rodilla, kinesio taping, tratamiento, soporte articular.

1. INTRODUCCIÓN

La rodilla es una de las articulaciones más importantes del cuerpo humano. Es un elemento muy importante durante la marcha, además de que soporta el peso del cuerpo. Al ser una articulación sometida a grandes cargas de trabajo y a diversas fuerzas, es una articulación muy propensa a padecer distintas afecciones, entre las principales está la osteoartritis.

La osteoartritis o artrosis (OA), es la más común de las enfermedades reumáticas crónicas y una de las principales causas de discapacidad relacionada con la movilidad, que afecta a casi la mitad de la población (Lavalle Montalvo, 2010)(Wang et al., 2020). Este tipo de enfermedad, se presenta en forma de dolor e inflamación en aquellas articulaciones que son sometidas a cargas o con gran movilidad (Primorac et al., 2020).

Esta enfermedad, se caracteriza por una progresiva degeneración y pérdida del cartílago articular, condicionando un estrechamiento del espacio articular y dando lugar a la formación de osteofitos (Primorac et al., 2020)(Oteo Álvaro, 2021). La KOA (osteoartritis de rodilla por sus siglas en inglés) se considera una enfermedad silenciosa, debido a que no muestra síntomas hasta encontrarse en una etapa avanzada (Oo et al., 2017).

En la actualidad, no existe una causa establecida para el desarrollo de OA (Lespasio et al., 2017). Se considera que factores como: los antecedentes familiares, la edad, el sobrepeso, entre otros, pueden ser los causantes de tal enfermedad.

Una órtesis es un dispositivo aplicado al cuerpo externamente con el fin de modificar aspectos estructurales o la funcionalidad del sistema neuromusculo-esquelético (Nelson et al., 2018). Las alternativas mecánicas para el tratamiento de KOA, como son la órtesis, son una gran opción al ser utilizadas como un soporte para el paciente. Se han presentado pruebas sólidas de que las fuerzas mecánicas juegan un papel importante en la predisposición a las dolencias y en el desarrollo de daños estructurales (Georgiev & Angelov, 2019). El potencial de las órtesis de rodilla como una opción de tratamiento no quirúrgico y no farmacológico para las personas con artrosis ha sido destacado en varios estudios. Un estudio de diseño cruzado informó sobre mejoras en el equilibrio estático y dinámico al utilizar una rodillera de neopreno acomodativa (Segal, 2012). Por otro lado, se llevó a cabo un análisis para evaluar la reducción del dolor y la mejora de la inestabilidad de la rodilla utilizando una rodillera blanda en pacientes con KOA. Los resultados del estudio revelaron una disminución significativa del dolor y una mejora en la estabilidad dinámica de la rodilla (Cudejko et al., 2019).

El Kinesio Taping (KT) es una forma muy utilizada de vendaje elástico que consiste en aplicar una tensión óptima a lo largo de la cinta y colocar el músculo objetivo en una posición estirada (Ye et al., 2020). Se ha demostrado que una sola aplicación de kinesiotaping puede tener efectos inmediatos significativos sobre la amplitud de movimiento, el dolor y el estado funcional en pacientes con osteoartritis de rodilla (Aydoğdu et al., 2017). Además, se sugiere el KT como un

ISSN: 2992-8338

método de tratamiento eficaz para controlar el dolor en la osteoartritis de rodilla, sobre todo para mejorar la fuerza muscular isocinética (Mao et al., 2021).

En este artículo se presenta un diseño de órtesis con la finalidad de proporcionar un apoyo óptimo a los músculos, tendones y ligamentos de la articulación de la rodilla, alineando así la articulación para reducir el desgaste y así mismo evitar la progresión de la osteoartritis. El objetivo es integrar los principios del kinesio taping en el diseño de la órtesis incorporando dos bandas elásticas en su estructura. Este enfoque innovador combina las ventajas de las órtesis y las tecnologías de kinesio taping. Al sustituir la cinta kinesio tradicional por bandas elásticas fijadas a la órtesis, se espera un efecto sinérgico que ofrezca apoyo, retroalimentación propioceptiva y activación muscular específica. El diseño estará compuesto por materiales textiles hipoalergénicos para garantizar un resultado funcional, ergonómico y seguro. Se adoptará un enfoque multidisciplinario que incluye aspectos ortopédicos, biomecánicos y textiles para el diseño de la órtesis. Es importante reconocer algunas limitaciones del proyecto. En primer lugar, el estudio se concentrará únicamente en pacientes diagnosticados de KOA de grado I, además, el proyecto se centrará principalmente en evaluar el impacto de la órtesis en la reducción del dolor y la calidad de la marcha, pudiendo pasar por alto otros aspectos importantes del tratamiento de la KOA.

2. DISEÑO DE ÓRTESIS

Los parámetros de diseño de la órtesis se establecieron mediante la adquisición de medidas generales de un sujeto de prueba (el cual dio su consentimiento) utilizando cinta adhesiva. Este método permitió captar con precisión la forma y la estructura de la rodilla, como se observa en la figura 1.



Figura 1. Estructura rodilla elaborada con cinta adhesiva.

Durante este proceso, se puso especial énfasis en identificar las áreas que necesitaban un fuerte apoyo sin obstaculizar la movilidad natural de la articulación. Esto permitiría optimizar la funcionalidad de la órtesis y mejorar su desempeño al proporcionar el soporte necesario sin limitar la movilidad requerida para la articulación de la rodilla. Al realizar este modelo, se obtuvieron los parámetros antropométricos de la articulación del sujeto, los cuales se observan en la figura 2. Estas medidas del sujeto se ajustan a la clasificación de talla "S", especificada en tablas de tamaños y medidas de distintas órtesis comerciales.

Con el objetivo de diseñar una órtesis que no comprometiera la salud del usuario y, en cambio, brindara un soporte adecuado a la articulación se realizó un experimento para medir la presión adecuada y máxima que pueden tolerar sujetos sanos, con el fin de diseñar una órtesis segura y efectiva para la rodilla. En este experimento participaron 16 sujetos sanos (los cuales dieron su consentimiento), se utilizó un baumanómetro médico que proporciona lecturas en mmHg, para medir la presión mientras los participantes permanecían de pie. El baumanómetro se colocó alrededor del muslo, ajustando la presión hasta que el sujeto se sintiera cómodo (presión apta), y luego aumentando hasta que reportara incomodidad (presión máxima). Este proceso se repitió en la rodilla y la pantorrilla.

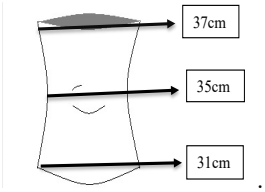


Figura 2. Medidas antropométricas del sujeto de prueba.

El experimento tuvo como objetivo principal determinar la presión máxima que la articulación de la rodilla y sus componentes pueden soportar sin comprometer su fisiología. Se evaluó la distribución de la presión percibida como adecuada en el muslo, la rodilla y la pantorrilla por parte de los participantes. Para el muslo, la media general fue de 43.25 mmHg (5766.19 Pa), con un límite superior de 56.25 (7499.38 Pa) y un límite inferior de 30.25 (4033 Pa). En la rodilla, la media fue de 45.62 mmHg (6082.16 Pa), con un límite superior de 64.05 (8539.29 Pa) y un límite inferior de 27.19 (3625.03 Pa). En la pantorrilla, la media fue de 55.93 mmHg (7456.72 Pa), con un límite superior de 76.03 (10136.50 Pa) y un límite inferior de 35.83 (4776.94 Pa). Este análisis fue esencial, dado que una presión máxima prolongada podría inducir fatiga muscular prematura y afectar la salud articular. Cabe destacar que la presión máxima está intrínsecamente relacionada con el ajuste individual de la órtesis por parte de cada sujeto para adaptarla a su rodilla y su comodidad percibida.

Antes de diseñar y fabricar la órtesis de rodilla, se consultaron las siguientes normas: norma oficial mexicana NOM-241-SSA1-2021, ISO-13485, ISO 13485:2016, ISO-22523:2006 y ISO-10993-1; con el objetivo de establecer los requisitos mínimos para los procesos de diseño, desarrollo y gestión de calidad en la fabricación de dispositivos médicos. Se consideraron métodos de ensayo aplicables a las órtesis externas, requisitos de materiales y riesgos potenciales como la irritación, la sensibilización y otros efectos adversos que podrían surgir debido a la exposición a un dispositivo médico. Se evaluaron varios tipos de tejidos elásticos, suaves y transpirables de diferentes proveedores para seleccionar los materiales de la órtesis de rodilla. Se consultó la composición de fibras de cada tejido en la base de datos del proveedor, obteniendo el porcentaje de cada fibra. Se realizaron ensayos de tensión según la norma ASTM D5034-09 (2017) para determinar la resistencia y alargamiento de los tejidos textiles adquiridos. De estos ensayos se seleccionaron las telas Suavenet y Licra Nilón, fueron seleccionadas debido a su elasticidad controlada, lo que significa que pueden estirarse de manera limitada cuando se someten a fuerzas, permitiendo que la órtesis se ajuste cómodamente a la forma de la rodilla y brinde el soporte necesario. Además, la tela debe tener una resistencia adecuada para evitar una deformación excesiva o permanente. Esta resistencia garantiza que la órtesis mantenga su forma original y continúe aplicando la cantidad adecuada de compresión a la rodilla a lo largo del tiempo, sin perder eficacia.

ISSN: 2992-8338

Para la elaboración del diseño se empleó el software CLO3D, una herramienta de diseño en 3D que utiliza motores gráficos 3D para crear modelos tridimensionales de ropa. Este software permite simular movimientos y ajustes, además de representar de manera realista las texturas y propiedades de las telas. También incluye algoritmos de simulación de telas que ayudan a los diseñadores a visualizar cómo se pliegan, caen y se ajustan las prendas en un maniquí virtual (CLO 3D, 2009). Este software es capaz de realizar cálculos de fuerzas y esfuerzos de tensión en la superficie de la tela, por lo que es una gran herramienta para el análisis del comportamiento de la órtesis cuando se utiliza en una persona.

Basándose en el análisis del modelo anatómico de la rodilla y en órtesis comerciales, se creó un boceto en el software Clo3D para representar el diseño propuesto de la órtesis a fabricar el cual se observa en la figura 3. Se determinó que se utilizaría un diseño de órtesis abierta, lo que permitiría ajustarla a cualquier tamaño de pierna, proporcionando un mayor ajuste y estabilidad a la rodilla.

Esta órtesis se compone de una estructura elástica en forma *mariposa*, se trata de un diseño de órtesis abierta, lo que significa que se ajustará mediante velcro para adaptarse al tamaño y comodidad de la pierna del usuario. Además, se integraron dos cintas de *elástico tejido* comercial dobles en forma de V, fabricadas con poliéster y gomas elásticas de caucho. Estas cintas se añadieron al diseño para proporcionar una mayor tensión y soporte, garantizando una presión adecuada sobre la articulación de la rodilla.

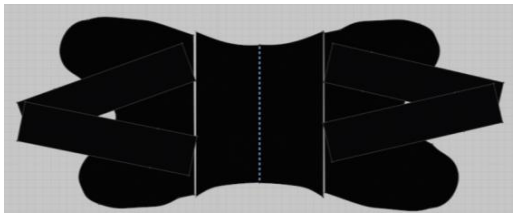


Figura 3. Boceto de órtesis en software Clo3D.

Una vez que se tuvo el boceto, se procedió al trazado de los patrones en el software Clo3D. Las medidas utilizadas para crear estas piezas fueron obtenidas del sujeto de prueba del modelo de cinta adhesiva. Clo3D ofrece la opción de generar un avatar y ajustar sus medidas, por lo que se utilizaron las medidas del sujeto de prueba para diseñar la órtesis. Además, el software permite escalar las medidas de los patrones, por lo que al tratarse de un sujeto talla S, solo fue necesario cambiar la configuración para obtener las medidas de los patrones en otras tallas.

Este modelo de órtesis consta de cuatro piezas principales: dos piezas 1 dispuestas una sobre la otra en la parte posterior y dos piezas 2, una a cada lado en los laterales. La pieza 2 incorpora el sistema de cierre de la órtesis utilizando velcro. La figura 4 ilustra los patrones de las piezas 1 y 2 trazadas en el software Clo3D.

La figura 5 exhibe los patrones de todas las piezas que conforman la órtesis. Además de las piezas 1 y 2, se muestran las bandas elásticas y las áreas de velcro para el cierre de la órtesis. Cada pieza se muestra con sus dimensiones en centímetros, correspondientes a la talla S. Después de diseñar todas las piezas, se les asignaron propiedades de material individuales. El software permite seleccionar materiales textiles predefinidos o crear nuevos materiales estableciendo propiedades físicas. La tela Suavenet no estaba definida en el software, por lo que se tuvo que definir basándose en los ensayos de tensión. En cambio, la Licra Nilón ya estaba definida, por lo que simplemente se asignó el material a la tela. Las bandas elásticas se clasificaron como "elástico" en el software, mientras que el velcro, al ser solo el sistema de cierre, se consideró como una costura.

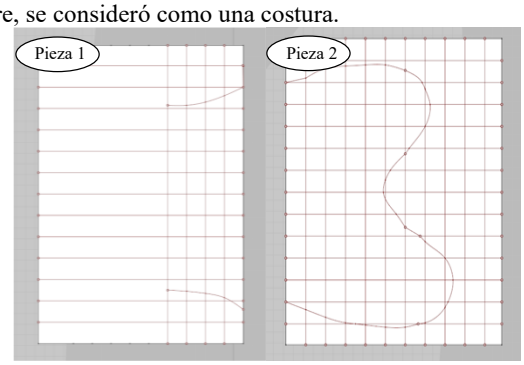


Figura 4. Patrones de modelo de órtesis, pieza 1 y 2.

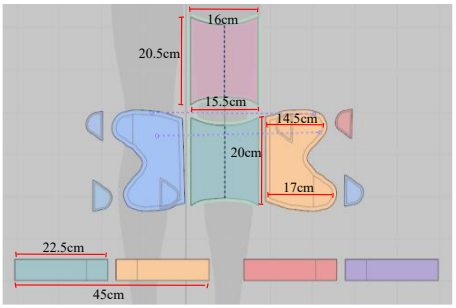


Figura 5. Patronaje órtesis en el software CLO3D, piezas completas.

Por otro lado, en la figura 6, se ilustra la órtesis colocada en un avatar. En la imagen A, se muestra el sistema de cierre de la órtesis, que implica superponer una parte de la pieza 2 sobre la otra, tanto en la parte superior como en la inferior. La imagen B representa la órtesis cerrada, pero sin las bandas elásticas, con la intención de facilitar una mejor comprensión del sistema de cierre y ajuste.

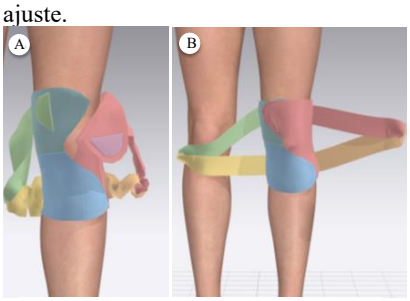


Figura 6. Modelo de órtesis en avatar.

Las figuras 7 y 8 presentan un mapa de tensiones, correspondiente a un estudio cuasiestático, expresadas en milímetros de mercurio (mmHg), destacando las áreas de mayor tensión que se identifican en rojo. Es importante destacar que la tensión obtenida en el software Clo3D puede variar según el nivel de ajuste aplicado a la órtesis, es decir, cuán apretada se coloque, esto dependerá de la percepción de comodidad del usuario al colocarse la órtesis. En las figuras se muestran puntos específicos de tensión en la estructura de la órtesis y en la banda elástica, respectivamente. Por ejemplo, en la figura 7, el punto C) alrededor del muslo refleja un valor de

ISSN: 2992-8338

77.50 mmHg (10332.48 Pa); el punto D) representa el valor alrededor de la rótula, alcanzando los 92.28 mmHg (12302.98 Pa); mientras que el punto E) muestra el valor alrededor de la pantorrilla, que es de 130 mmHg (17331.9 Pa). En la figura 8, se presentan puntos específicos de tensión en la banda de la órtesis: el punto F) representa el valor mínimo de tensión, llegando a 176.17 mmHg (23487.4 Pa); el punto G) representa el valor máximo aproximado de tensión en la órtesis, que alcanza 266.97 mmHg (35593.07 Pa). Es importante tener en cuenta que estos valores pueden variar considerablemente según el nivel de ajuste aplicado en la órtesis.

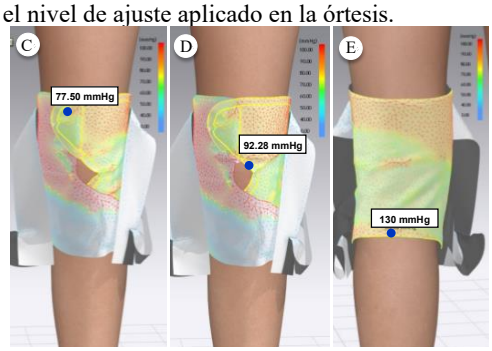


Figura 7. Puntos de tensión en órtesis 3. C) Punto alrededor del muslo, D) Punto alrededor de la rótula, E) Punto alrededor de la pantorrilla.

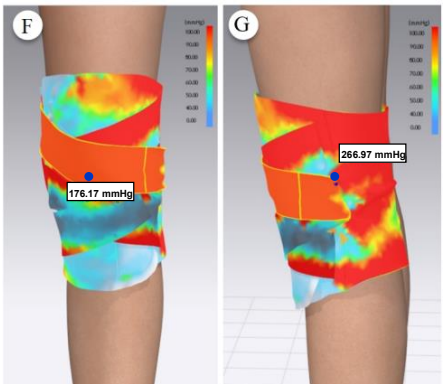


Figura 8. Puntos de tensión en banda elástica de órtesis 3. F) Punto mínimo en la banda, G) Punto máximo en la banda.

3. FABRICACIÓN DE LA ÓRTESIS

Una vez seleccionados los materiales para la elaboración del prototipo de la órtesis, se procedió con la fabricación utilizando principalmente tela licra de nilón compuesta por 77% nilón/23% spandex y tela suavenet compuesta por 86% poliéster/14% spandex (según especificaciones del fabricante). Se empleó elástico tejido de 100 mm de ancho para las bandas elásticas y soportes de hidrogel en los laterales de la rótula para proporcionar un mayor soporte y fijación, además de aumentar la comodidad del usuario.

El sistema de cierre y ajuste de la órtesis cuenta con velcro de 100 mm de ancho y 3.07 mm de espesor, con una fuerza de corte de 25.65 N/cm2 y una vida útil de 2000 ciclos de cierre, según las especificaciones del fabricante. Se incorporará bies elástico en los extremos de la órtesis para brindar soporte y prevenir roturas por el uso repetido de la misma tela. La elección de hilo reforzado es fundamental para garantizar la resistencia del producto final.

• **Trazado y corte de las piezas:** La etapa inicial del proceso de fabricación involucró el trazado y corte de las piezas del prototipo (ver figura 9). Se utilizaron los patrones previamente elaborados para el diseño, que se encuentran detallados en la figura 5. Con el uso de tiza para costura, se procedió a marcar con precisión todo el patrón en la tela asignada a cada pieza. Posteriormente, se llevó a cabo el corte de las piezas utilizando tijeras de costura (ver figura 10).

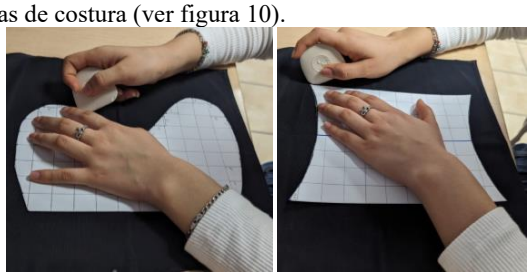


Figura 9. Trazado de las piezas 1 y 2 de la órtesis.



Figura 10. Piezas 1,2 y bandas elásticas de la órtesis.

• **Sistema de cierre con velcro:** Para el cierre de la órtesis se utilizó velcro, un material reconocido por su alta resistencia y facilidad de uso (ver figura 11). El sistema de cierre constará de dos piezas de gancho de velcro en las bandas elásticas para su ajuste, y dos piezas de velcro en el cuerpo de la órtesis para su cierre y ajuste. El trazado de estas piezas se realizó con base en los patrones predefinidos, garantizando así la adecuada colocación y funcionalidad del sistema de cierre en la órtesis.
De igual manera, la felpa de velcro se colocará en la parte posterior de la pieza 1 de tela suavenet con la intención de brindar al usuario un amplio rango de ajuste de las bandas elásticas. Esta felpa también se situará sobre la tela de nailon, en la cara opuesta a la pestaña del gancho del velcro, para garantizar la funcionalidad del sistema de cierre, sumada a estas se cortaron 2 piezas más de felpa las cuales cubrirán los soportes C de hidrogel alrededor de la rótula.

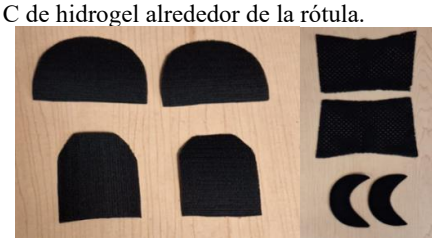


Figura 11. Piezas gancho y felpa de velcro.

• **Montaje preliminar de la órtesis:** Una vez se tenían todas las piezas conformantes de la órtesis, se procedió a realizar un montaje preliminar para identificar posibles ajustes antes de la costura final. La figura 12 muestra el montaje preliminar de la órtesis de rodilla.

• **Armado y costura de la órtesis:** Una vez obtenidas todas las piezas de la órtesis, se procedió al ensamblaje y costura utilizando una máquina de coser e hilo reforzado. La figura 13 ilustra el proceso de costura de la órtesis de rodilla.

ISSN: 2992-8338



Figura 12. Montaje preliminar órtesis de rodilla.


Figura 13. Procesos de costura del prototipo de órtesis de rodilla.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos a través de la metodología de obtención de modelos fueron altamente satisfactorios.

El análisis de las normas establecidas para la fabricación de este tipo de dispositivos médicos guió el diseño para que fuera creado y fabricado sin afectar el bienestar del usuario, además mediante el uso de la herramienta Clo3D, se logró obtener modelos detallados y precisos que fueron fundamentales en el proceso de fabricación de la órtesis. La visualización clara y precisa de estos modelos facilitó enormemente el diseño y la planificación del proceso de fabricación.

La fabricación de la órtesis exclusivamente con materiales textiles fue un logro destacado. Este enfoque proporcionó una solución cómoda y funcional para los usuarios, dado que la órtesis se ajusta de manera natural a los movimientos del cuerpo sin limitar la movilidad. Esta característica es crucial para garantizar la comodidad y el bienestar del usuario durante el uso de la órtesis.

La incorporación de bandas elásticas al diseño sustituyendo el kinesio-taping tradicional resultó en una mejora significativa en la funcionalidad de la órtesis. Esta combinación de tecnologías tiene el potencial de optimizar la alineación biomecánica, reducir el dolor y mejorar los resultados funcionales para las personas con osteoartritis de rodilla en etapa inicial. Para una mejor comprensión del diseño y la estructura de la órtesis, se presentan las vistas anterior y posterior de la misma en la figura 14. Además, en la figura 15 se muestra la órtesis colocada en una persona, lo que brinda una mejor apreciación de cómo se adapta y funciona en el contexto del usuario final.

5. DISCUSIÓN

Con el fin de realizar una comparativa entre los modelos de órtesis comerciales y el diseño desarrollado en este proyecto, se reprodujeron en Clo3D dos de los diseños de órtesis más comunes: 1. la órtesis serrada sin bandas elásticas y 2. la órtesis serrada con bandas elásticas simples. Este proceso tuvo como objetivo evaluar la capacidad de estos tipos de órtesis para proporcionar la tensión adecuada y aplicar la presión necesaria en la articulación de la rodilla. Los resultados indicaron que tanto la órtesis 1 como la órtesis 2 presentan algunas limitaciones, como la falta de ajustabilidad en su estructura debido a que son estructuras cerradas. En el caso de la órtesis 2, cualquier ajuste se lograría únicamente a través de las dos bandas conectadas a la estructura de la órtesis.


Figura 14. Órtesis de rodilla vista anterior y posterior.


Figura 15. Órtesis colocada en una persona.

El diseño de la órtesis presentada en este estudio aborda de manera integral los inconvenientes asociados al desgaste progresivo de la rodilla, que pueden desencadenar en fenómenos adversos como impactos internos, falta de tensión en los ligamentos, desalineamiento de la rótula y sobreesfuerzo en los ligamentos colaterales. Este diseño innovador se ha desarrollado considerando cada uno de estos aspectos para evitar que el círculo vicioso de la osteoartritis continúe afectando la articulación. Por ejemplo, el diseño abierto permite una atención adecuada de la rodilla inflamada con mínimas molestias en su ubicación y ajuste, mientras que el diseño lobular ergonómico se adapta perfectamente a la superficie de la rodilla. Además, el soporte para la rótula en el cierre de la órtesis evita su desalineamiento, y el uso de insertos de hidrogel proporciona una mayor comodidad sobre la articulación. La sujeción con velcro permite una adaptación precisa del tamaño de la órtesis, mientras que las dos bandas elásticas brindan la tensión necesaria para prevenir el movimiento lateral en varo o valgo de la articulación. Asimismo, el cuerpo de la órtesis rodea la articulación proporcionándole soporte en todas las direcciones laterales, lo que ayuda a limitar la incertidumbre de posición causada por el desgaste.

ISSN: 2992-8338

La investigación busca diseñar y fabricar una órtesis para mejorar la calidad de vida en pacientes con KOA grado I, enfocándose en reducir el dolor y mejorar la marcha. Las limitaciones del proyecto incluyen el enfoque en un estadio específico de la enfermedad, la posible omisión de otros aspectos del tratamiento de la KOA, y la falta de consideración exhaustiva de las diferencias individuales como las variaciones en la mecánica corporal o las afecciones subyacentes.

6. TRABAJOS FUTUROS

Con el objetivo de evaluar el correcto funcionamiento de la órtesis de rodilla propuesta en este trabajo de investigación, se ha elaborado un detallado protocolo de investigación el cual fue aprobado por un comité de ética. El protocolo tiene como meta principal evaluar la eficacia de la órtesis de rodilla en brindar soporte y estabilidad a la articulación de la rodilla, con especial atención en la retención adecuada de la rótula y la prevención de movimientos en varo y valgo. A través de pruebas físicas y análisis termográficos.

El análisis de los datos de las pruebas físicas se llevará a cabo mediante la comparación de los resultados de cada prueba utilizando estadísticas descriptivas, identificando posibles mejoras o cambios en el rendimiento con la órtesis. Además, se realizará una comparación de la distribución térmica a través de las termografías.

7. CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación, se siguió una metodología rigurosa para obtener modelos precisos y detallados de órtesis de rodilla. Se empleó el software Clo3D, el cual permitió replicar diseños comerciales y compararlos con el diseño innovador propuesto en este estudio. Esta metodología resultó efectiva para evaluar las características y funcionalidades de cada modelo, proporcionando una base sólida para el análisis y la toma de decisiones en el diseño final de la órtesis.

En cuanto al uso de Clo3D, los resultados demostraron su eficacia para la creación y análisis de los modelos de órtesis. Este enfoque tecnológico facilitó una evaluación detallada, proporcionando información valiosa que contribuyó al diseño final de la órtesis de rodilla.

El proceso de fabricación de la órtesis se llevó a cabo con precisión. Se aplicaron normas, técnicas y materiales específicos, entre ellos la tela suavenet y la tela licra nilón, cuyas propiedades y beneficios fueron confirmados mediante ensayos de tracción mediante la norma ASTM D5034-09 (2017). Estos materiales resultaron ser los más adecuados para garantizar un soporte óptimo y una alineación cómoda con la anatomía de la rodilla.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en diferentes tejidos respaldaron la efectividad del diseño de la órtesis. Se destacó su capacidad para proporcionar un soporte adecuado sin comprometer la movilidad natural de la articulación, lo cual es fundamental para el tratamiento de la osteoartritis de grado 1.

En conclusión, los hallazgos de esta investigación sugieren que la órtesis de rodilla diseñada tiene el potencial de impactar positivamente en la gestión no invasiva de la osteoartritis de grado 1. Este avance podría representar una mejora significativa en la calidad de vida de los pacientes al ofrecer un tratamiento eficaz, cómodo y adaptado a las necesidades de cada individuo.

REFERENCIAS

CLO 3D. (2009). CLO 3D. https://www.clo3d.com/es/

Lavalle Montalvo, C. (2010). Osteoartritis. http://www.facmed.unam.mx/sms/temas/2010/06_jun_2k10.pdf

Segal, N. A. (2012). Bracing and Orthoses: A Review of Efficacy and Mechanical Effects for Tibiofemoral Osteoarthritis. PM and R, 4(5 SUPPL.). https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2012.01.018

Aydoğdu, O., Sari, Z., Yurdalan, S. U., & Polat, M. G. (2017). Clinical outcomes of kinesio taping applied in patients with knee osteoarthritis: A randomized controlled trial. Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation, 30(5), 1045–1051. https://doi.org/10.3233/BMR-169622

Lespasio, M. J., Piuzzi, N. S., Husni, M. E., Muschler, G. F., Guarino, A., & Mont, M. A. (2017). Knee Osteoarthritis: A Primer. In The Permanente journal (Vol. 21). https://doi.org/10.7812/TPP/16-183

Oo, W. M., Linklater, J. M., & Hunter, D. J. (2017). Imaging in knee osteoarthritis. In Current Opinion in Rheumatology (Vol. 29, Issue 1, pp. 86–95). Lippincott Williams and Wilkins. https://doi.org/10.1097/BOR.0000000000000350

Nelson, M. J., Andrioly, V., Andrés, C., Palencia, P., Hernando, I. C., Niño, V., Andrés José, I., & Torres, R. (2018). Órtesis activa de rodilla para rehabilitación 2 Diseño de una órtesis activa de rodilla para la primera etapa de la rehabilitación.

Cudejko, T., van der Esch, M., van den Noort, J. C., Rijnhart, J. J. M., van der Leeden, M., Roorda, L. D., Lems, W., Waddington, G., Harlaar, J., & Dekker, J. (2019). Decreased Pain and Improved Dynamic Knee Instability Mediate the Beneficial Effect of Wearing a Soft Knee Brace on Activity Limitations in Patients With Knee Osteoarthritis. Arthritis Care and Research, 71(8), 1036–1043. https://doi.org/10.1002/acr.23722

Georgiev, T., & Angelov, A. K. (2019). Modifiable risk factors in knee osteoarthritis: treatment implications. In Rheumatology International. Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/s00296-019-04290-z

Primorac, D., Molnar, V., Rod, E., Jeleč, Ž., Čukelj, F., Matišić, V., Vrdoljak, T., Hudetz, D., Hajsok, H., & Borić, I. (2020). Knee osteoarthritis: A review of pathogenesis and state-of-the-art non-operative therapeutic considerations. In Genes (Vol. 11, Issue 8, pp. 1–35). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/genes11080854

Wang, L. J., Zeng, N., Yan, Z. P., Li, J. T., & Ni, G. X. (2020). Post-traumatic osteoarthritis following ACL injury. In Arthritis Research and Therapy (Vol. 22, Issue 1). BioMed Central Ltd. https://doi.org/10.1186/s13075-020-02156-5

Ye, W., Jia, C., Jiang, J., Liang, Q., & He, C. (2020). Effectiveness of elastic taping in patients with knee osteoarthritis: A systematic review and meta-analysis. American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 99(6), 495–503. https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000001361

Mao, H. Y., Hu, M. T., Yen, Y. Y., Lan, S. J., & Lee, S. Da. (2021). Kinesio taping relieves pain and improves isokinetic not isometric muscle strength in patients with knee osteoarthritis—a systematic review and meta-analysis. In International Journal of Environmental Research and Public Health (Vol. 18, Issue 19). MDPI. https://doi.org/10.3390/ijerph181910440

Oteo Álvaro, A. (2021). Ethiopathogenic mechanism of osteoarthritis. Revista de La Sociedad Espanola Del Dolor, 28, 11–17. https://doi.org/10.20986/resed.2021.3851/2020

ISSN: 2992-8338

Creación de un Dataset para la Lengua de Señas Mexicana Usando el Framework Holistic de MediaPipe

Abisai Nava-Ramirez*, W. Campos Francisco *, Alicia Martínez-Rebollar **, C. Morales-Morales *

** 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: MG16520484@chilpancingo.tecnm.mx , wilfrido.cf@chilpancingo.tecnm.mx, comorales82@gmail.com)*

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

Resumen: El desarrollo en el campo de visión artificial para la lengua de señas a menudo se basa en conjuntos de datos derivados de lenguas de otros países o en uso de herramientas externas para la captura de los datos, lo que plantea incertidumbres con respecto a su aplicabilidad a la Lengua de Señas Mexicana (LSM). Para abordar esta limitación, se tomó la decisión de crear un conjunto de datos personalizado adaptado a los matices culturales y lingüísticos de LSM. La creación del conjunto de datos se llevó a cabo utilizando una cámara RGB estándar y aprovechando el modelo Holistic de MediaPipe.

Keywords: Dataset, MediaPipe, Holistic, LSM, Camara RGB.

1. INTRODUCCION

A nivel mundial, las comunidades sordas han enfrentado desafíos en la difusión generalizada de sus Lenguas de Señas (LS), confinándolas principalmente a entornos más limitados. La adaptación funcional de las lenguas naturales a lo largo del tiempo para satisfacer las necesidades comunicativas es un fenómeno constante (Castro & Cruz-Cruz, 2021). Sin embargo, la recopilación de información precisa sobre el enriquecimiento y la evolución de las LS se ve obstaculizada por la falta de registros fiables.

En el contexto específico de México, la diversidad lingüística refleja su rica herencia cultural y la convivencia de diversas comunidades, a pesar de que se reconoce la multiplicidad de lenguas habladas en el país, es común que la atención se centra en estas, relegando a las LS utilizadas por las comunidades sordas a un segundo plano (Cruz Aldrete, 2009).

Las comunidades sordas a menudo son marginadas debido a estereotipos y falta de información entre aquellos no familiarizados con ellas, al resaltar y promover la Lengua de Señas Mexicana (LSM), se desafían estos estigmas y se permite una comprensión más profunda y respetuosa de las comunidades sordas (Aldrete & Ramos, 2021).

Teniendo en cuenta que la LS no es universal, cada país ha aportado diferentes formas para interpretarla en el ámbito computacional, sin embargo, se ha identificado un desafío específico en el contexto donde la disponibilidad de conjuntos de datos (*dataset*) para la LSM para su estudio y desarrollo tecnológico es escasa; esta carencia representa un obstáculo significativo para el desarrollo de tecnologías innovadoras que puedan mejorar la calidad de vida y la inclusión de las personas sordas en la sociedad mexicana, ya que la disponibilidad de *datasets* estructurados adecuadamente es fundamental para impulsar avances en aplicaciones de inteligencia artificial.

Al proporcionar datos estructurados y etiquetados en los *datasets,* facilita que los algoritmos de aprendizaje automático identifiquen patrones, como, por ejemplo, en reconocer señas de las LS de manera que las aplicaciones desarrolladas con estos algoritmos ayudarán en mejorar la comunicación, la educación y la accesibilidad para las comunidades sordas.

Por lo tanto, se propone la creación de un dataset para señas dinámicas donde se incluirán las manos, el cuerpo y la cara, utilizando únicamente datos visuales convencionales, sin depender de cámaras de profundidad u otras herramientas externas especializadas, permitiendo demostrar que es posible desarrollar modelos efectivos de visión artificial utilizando solo información visual estándar, sin necesidad de tecnologías adicionales.

Con el fin de alcanzar este objetivo, se usará el *framework* de *MediaPipe* desarrollado por *Google*, el cual ofrece una solución innovadora mediante modelos previamente entrenados para la detección del movimiento del cuerpo.

2. REVISION DE LA LITERATURA

La revisión de la literatura se centra exclusivamente en las iniciativas de creación de conjuntos de datos para el reconocimiento y la interpretación de la LSM, permitiendo explorar las diferentes metodologías empleadas para recopilar y etiquetar datos, así como las tecnologías utilizadas para capturar y analizar gestos y movimientos característicos de la lengua de señas.

2.1 Cámaras de profundidad

En su artículo de 2022, Ríos-Figueroa et al. (2022) proponen el uso de un sistema de visión artificial que emplea un sensor 3D Kinect, destacando que este sistema tiene la capacidad de operar con solo ajustes internos, utilizando dos sistemas de

ISSN: 2992-8338

coordenadas, esférica y cartesiana, recopilando información estadística sobre las formas geométricas, para la segmentación del alfabeto estático de la LSM. Sin embargo, un obstáculo es que el uso de una sola cámara RGB-D puede limitar la visión disponible de la mano en acción, especialmente si la mano se gira demasiado, lo que podría ocultar ciertas partes y afectar la captura adecuada de la forma.

Otros de los enfoques en el uso de cámaras de profundidad en combinación con redes neuronales recurrentes como LSTM (Long Short-Term Memory) y GRU (Gated Recurrent Unit) fuerons propuestos por Mejía-Peréz et al. (2022) demostrando que la combinación de gestos de manos, cara y cuerpo usando el *framework MediaPipe*, supera el rendimiento de enfoques que utilizan solo una o dos fuentes de entrada.

Sosa-Jiménez et al. (2017) propusieron un sistema que utiliza una arquitectura bimodal combinando imágenes 2D capturadas por una cámara Kinect con gestos representados por las coordenadas *(x, y, y z)* de las manos y codos derechos e izquierdos, las coordenadas 3D se utilizan como entradas para un modelo de Markov oculto. Sin embargo, este sistema puede ser afectado por las condiciones de iluminación debido al uso de cámaras infrarrojas en el sensor Kinect, lo que podría afectar su rendimiento en entornos con luz solar.

Trujillo-Romero & García-Bautista, (2021) contribuyeron a crear un dataset utilizando un sensor Kinect, con el procesamiento de la nube de puntos obtenida directamente del sensor mediante el SDK (Software Development Kit) proporcionado por Microsoft; sin embargo, una vez ubicada y segmentada la mano, se realiza el seguimiento con el sensor Kinect, que permite almacenar esta trayectoria como un conjunto ordenado de posiciones 3D, también conocidas como puntos, tanto el número de puntos, como, la precisión en el cálculo de las posiciones proporcionadas por el *SDK* del Kinect están directamente relacionados con la velocidad a la que se ejecuta un gesto frente al sensor y la respuesta del sensor a los cambios en la entrada.

2.2. Técnicas de segmentación

La siguiente técnica de segmentación, presentó un método para detectar y traducir gestos con las manos, utilizando el color negro de la ropa y el fondo para resaltar el área de investigación, en total se recopilaron un total de 249 frases de 2480 videos, con una duración de 1 a 3 segundos cada uno, para lograr una identificación precisa de las señas, por lo cual, Espejel-Cabrera et al., (2021) propusieron diferentes métodos, como *Otsu* y segmentación de conglomerados; sin embargo, se encontraron resultados insatisfactorios y un rendimiento deficiente en cuanto a la iluminación o el reflejo, por otro lado, el procesamiento *Hue, Saturation, Brightness*, resultó ser menos susceptible a la variación de luminancia en las imágenes, de manera que, el método descrito fue favorable al obtener datos de 249 palabras en entornos controlados. Sin embargo, se señala que el uso de la misma técnica con un enfoque en frases dinámicas presenta un desafío, ya que la técnica aplicada no es útil para ese fin.

Desde una perspectiva diferente, Samaan et al. (2022) abordaron los desafíos del reconocimiento de la Lengua de Señas Dinámicas (LSD), específicamente la complejidad de reconocer gestos complicados y la baja precisión de reconocimiento en entornos naturales. Se empleó la combinación de MediaPipe y modelos de redes neuronales recurrentes, como GRU, LSTM y LSTM bidireccional, para superar estas limitaciones. Destacaron la creación del conjunto de datos DSL10, que abordó la falta de conjuntos de datos basados en video para (LS).

Además, se destaca la consideración de palabras de LSD en entornos complejos en tiempo real y la exploración de algoritmos para el preprocesamiento de conjuntos de datos con diferentes duraciones de videos como posibles líneas de investigación futura.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Proceso de captura

El conjunto de datos se grabó utilizando una cámara HD de una computadora con una resolución de 1280 × 720 píxeles. Esto asegura que el dataset sea accesible utilizando una cámara ampliamente disponible para el público en general, permitiendo la captura de gestos de LSM de manera accesible.

3.2 Proceso de selección y análisis de señas

La construcción del dataset se basa principalmente en el Glosario Universitario de Lengua de Señas Mexicana publicado por la Universidad de Guadalajara en el año de 2023. Esto implica que las variaciones en las palabras pueden atribuirse a discrepancias regionales. La diferencia generacional también influye en la variación lingüística, ya que las señas utilizadas por adultos mayores de 60 años difieren de las empleadas por aquellos de entre 25 y 40 años; estas variaciones no están contempladas en el conjunto de datos.

3.3 Representaciones detalladas e instrucciones de las señas para el dataset

A continuación, en la Tabla 1 se exhiben las representaciones visuales de las señas, acompañadas de instrucciones detalladas sobre la forma correcta de realizar las señas.

Tabla 1. Señas para el dataset

Categoría	Palabra	Uso de manos
Saludos	Hola	Una mano
	Adiós	Una mano
	Buenos días	Ambas manos
	Buenas tardes	Ambas manos
	Buenas noches	Ambas manos
	Bienvenida	Dos manos
Preguntas	¿Cómo estás?	Dos manos

ISSN: 2992-8338

	Mucho gusto	Dos manos
	¿Cómo te llamas?	Dos manos
Expresiones de gratitud y cortesía	Gracias	Dos manos
	De nada	Una mano
Días de la semana	Lunes	Una mano
	Martes	Una mano
	Miércoles	Una mano
	Jueves	Una mano
	Viernes	Una mano
	Sábado	Una mano
	Domingo	Una mano
Verbos	Enseñar	Dos manos
	Estudiar	Dos manos

3.4 Modelo Holistic como medio de estimación de poses

MediaPipe está orientado al desarrollo de aprendizaje automático, facilitando la creación rápida de prototipos de tuberías de percepción con modelos de inferencia y otros componentes reutilizables (MediaPipe Model Maker, 2023). Esta técnica consiste en abstraer y conectar modelos de percepción individuales en pipelines mantenibles, facilitando la incorporación de nuevos pasos de procesamiento o modelos de inferencia y optimizando la ejecución en diferentes plataformas, además ofrece una variedad de modelos especializados, entre los cuales destacan el modelo de detección y seguimiento de manos (*Hand landmarks detection*), modelo de estimación de poses corporales (*Pose Landmark Detection*), el modelo de detector de rostros (Face detection) y el modelo más destacado, conocido como *Holistic*, que combina los anteriores modelos en un único sistema integral.

De acuerdo con la investigación realizada, se ha decidido utilizar el modelo *Holistic* de *MediaPipe*, el cual posibilita la combinación de componentes de puntos de referencia de postura, cara y mano, logrando así un punto de referencia integral del cuerpo humano. Esta elección facilita el análisis de gestos, posturas y acciones que involucran todo el cuerpo. La tarea específica implica la aplicación de un modelo de aprendizaje automático a un flujo continuo de imágenes.

En consecuencia, el modelo genera un total de 543 puntos de referencia en tiempo real. Estos incluyen 33 puntos de referencia de pose, 21 puntos de referencia de mano por mano y 468 puntos para la cara (Holistic Landmarks Detection Task Guide, 2023). Donde cada punto de referencia se compone de las coordenadas x, y, z, normalizadas a [0.0, 1.0] por el ancho (x) y el alto (y) de la imagen, mientras que z representa la profundidad del punto de referencia que se estima a partir de la muñeca, que es el punto de referencia más cercano a la cámara, a medida que el punto de referencia se aleja de la cámara, el valor de *z* se vuelve más grande.

En la figura 1, se puede apreciarse los puntos de referencia que utiliza MediaPipe para su modelo *Holístic,* en cambio, la figura 2 podemos apreciar la foto original antes de ser procesada por *MediaPipe*. Los puntos de referencia son el resultado de aplicar un modelo de aprendizaje automático a la imagen, que detecta y analiza las partes del cuerpo humano, los puntos de referencia se dividen en tres componentes: postura, cara y mano.

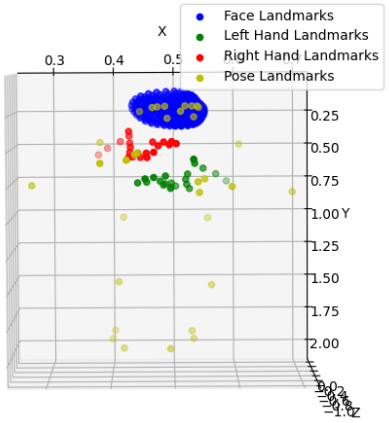


Figura 1. Grafica de la lista de coordenadas de los puntos de referencia de la cara, manos y cuerpo utilizando MediaPipe.

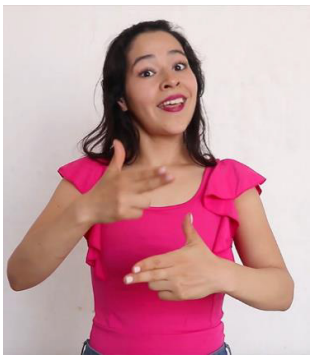


Figura 2. Frame utilizada para detectar los keypoints del modelo Holistic de MediaPipe. Tomado de (INETV, 2020)

Sin embargo, para aplicaciones específicas como el reconocimiento de la LSM, ciertos puntos pueden resultar irrelevantes o excesivos, como los 543 *landmarks* del modelo *Face Landmark Detection*, por lo cual, para optimizar la captura de datos y hacerla menos sensible a variaciones innecesarias, se ha tomado la iniciativa de modificar el modelo, esto implica eliminar los puntos de la cara que no son críticos para el reconocimiento de la LSM, como aquellos que no influyen significativamente en los gestos de las manos y la

ISSN: 2992-8338

postura corporal asociada con la LSM. Al reducir la cantidad de puntos a procesar, se puede simplificar el análisis y hacerlo más eficiente y robusto para las necesidades específicas de reconocimiento de la LSM.

3. Metodología

El plan de trabajo para la investigación se presenta en la Figura 3. Este diagrama detalla los procedimientos esenciales que se siguieron. En primer lugar, se recopilaron los datos utilizando una cámara de alta definición. Luego, se aplicó el modelo Holistic de MediaPipe para identificar los puntos clave de la mano en cada video, que consta de 30 cuadros por segundo.



Figura 3. Metodología para la elaboración del dataframe.

El proceso para el estudio propuesto incluye los siguientes pasos principales:

1. Selección de landmarks: Utilizando el modelo Holistic para la detección de poses de MediaPipe, se seleccionaron los puntos clave de las señas que se usarán en la investigación.
2. Adquisición del Conjunto de Datos: Se grabaron los datos utilizando una cámara RGB para capturar los gestos de LSM, abordando la falta de disponibilidad de conjuntos de datos dinámicos del LSM, sin uso de cámaras de profundidad.
3. Segmentación de Frame: Cada video en el estudio consta de aproximadamente 30 frames, que se dividieron en cuatro grupos distintos para su análisis.
4. Extracción de Características: De cada grupo de fotogramas, se extrajeron las características y se almacenaron en archivos numpy.

4. SELECCIÓN DE *LANDMARKS*

La importancia de utilizar los 21 puntos correspondientes a cada mano al capturar la posición de los dedos radica en que estos puntos incluyen la base y la punta de cada dedo, así como las articulaciones de la muñeca y la palma. Al capturar esta información de manera completa y precisa, se garantiza una representación fiel de la posición de las manos, lo cual es esencial para aplicaciones como el reconocimiento de señas.

Los gestos faciales desempeñan un papel fundamental al contribuir al significado comunicativo de la gestualidad, especialmente en entornos donde la interpretación es más es más humana y cercana, como en conversaciones entre dos personas y la capacidad única que tienen para diferenciar la intensidad emocional o el matiz afectivo con el cual se expresa un mensaje. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el objetivo principal es la creación de un conjunto de datos para la traducción automática de la LSM y aún queda mucho trabajo por hacer para lograr una interpretación completa de los gestos faciales. En consecuencia, se ha decidido minimizar el uso de gestos faciales a solo 11 de los 468 identificados, dando preferencia al empleo de los puntos clave (keypoints) señalados a continuación.

0 – Nose, 1 - Left eye (inner), 2 - Left eye, 3 - Left eye (outer), 4 - Right eye (inner), 5 - Right eye, 6 - Right eye (outer), 7 - Left ear, 8 - Right ear, 9 - Mouth (left) y 10 - Mouth (right)

Además, que los *keypoits* de referencia en las piernas carecen de relevancia para la traducción de la LSM, por lo que se han excluido de la consideración. Por lo cual, lo siguientes puntos para la parte derecha del cuerpo, se utilizó los siguientes *keypoints*

12 - Right shoulder, 14 - Right elbow, 16 - Right wrist y 24 - Right hip

Y para la parte izquierda, se usarán los siguientes

11 - Left shoulder, 13 - Left elbow, 15 - Left wrist y 23 - Left hip

Estos keypoints serán fundamentales para el desarrollo de sistemas de traducción automática de LSM, ya que permitirán capturar y representar de manera efectiva los elementos esenciales para la comunicación en esta lengua.

4.*1. Mejoras en la Captura de Posiciones de Manos y Cuerpo para Señas mediante Puntos Clave Adicionales*

Se han introducido mejoras significativas al agregar tres *keypoints* adicionales que amplían la capacidad de representación espacial, estos nuevos puntos se localizan en la frente, la barbilla y el centro del torso, dando un total de 61 *keypoints*, cada uno con sus coordenadas en x, y, y z; La inclusión de estos puntos claves refleja la naturaleza variada de los gestos en el lenguaje de señas, debido que algunos gestos pueden comenzar en la frente y descender hasta el centro del estómago, mientras que otros pueden iniciar debajo de los labios y extenderse hacia el cuerpo, estos *keypoints* adicionales permiten capturar con mayor precisión el inicio y la terminación de diferentes signos, mejorando así la capacidad de interpretación del modelo.

ISSN: 2992-8338

La integración de estos puntos clave adicionales no solo enriquece la representación espacial de los gestos, sino que también facilita una mayor comprensión de la gramática y la estructura de las señas al capturar de manera más completa las posiciones de las manos y el cuerpo, los sistemas de reconocimiento de señas pueden ofrecer una experiencia más precisa y efectiva en la interpretación de la LSM.

5. ADQUISICIÓN DEL CONJUNTO DE DATOS Y SEGMENTACIÓN DE *FRAMES*

La captura de las señas de la LSM, involucró la producción de 80 videos distintos por cada palabra en el que cada video ofrece una representación única de la palabra, mostrando diferentes estilos y velocidades, una vez grabados los videos, se dividen en 30 *frames* cada uno, donde cada *frame* representa una instantánea del movimiento de la palabra y que de acuerdo a la experimentación, se consideraron que 30 *frames* por segundo son suficientes para capturar y representar adecuadamente los movimientos necesarios para formar una palabra en LSM permitiendo así, una representación precisa de las señas realizadas; Además el sujeto realizo las señas sentado, a una altura de, 1 metro y 50 cm, con una distancia fija de un metro y 20 entre la cámara y el sujeto que realiza las señas para a asegurar que el tamaño relativo de las manos y los movimientos se mantenga constante en todos los videos, debido que es crucial una representación precisa de las señas en LSM, ya que, si la distancia variara, las señas podrían aparecer más pequeñas o grandes en los videos, lo que dificultaría la comparación y el análisis.

5. EXTRACCIÓN DE *KEYPOINTS*

Una vez que tenemos capturados nuestra muestra, usamos el framework de MediaPipe el cual realiza un análisis detallado de cada fotograma de cada uno de los vídeos, donde se centra en identificar y extraer los puntos de referencia que representan diferentes partes del cuerpo humano, como las manos, brazos, rostro y el torso, como se muestra en la figura 3, por lo cual, se comienza con la detección inicial de estas partes del cuerpo en cada fotograma. Este método elimina cualquier información no esencial, dejando únicamente los puntos de referencia que representan el movimiento de las señas, garantizado que en trabajos posteriormente, estos puntos de referencia sean sometidos a un análisis por medio de una red neuronal y que el enfoque esté completamente en los gestos y no en el entorno.

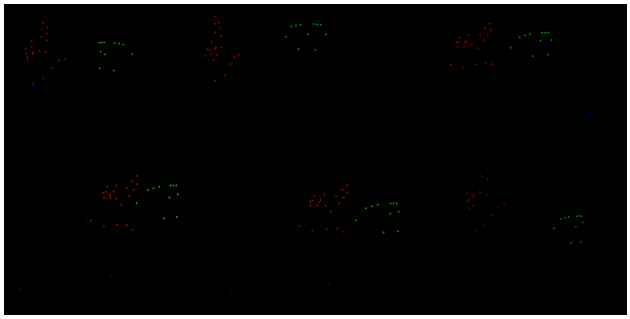


Figura 3. Secuencia de tiempo del proceso de una señal, vista por MediaPipe.

5.1. Almacenamientos

Una vez que se detectaron los *keypoints*, estos serán almacenados en un archivo *numpy* de una dimensión, basado en la evidencia los archivos unidimensionales, a diferencia de las estructuras más complejas como matrices o tensores multidimensionales (Müller & Guido, 2016), ofrecen una forma más directa y accesible de organizar datos lineales, esta simplicidad facilita tanto la lectura como la escritura de datos, ya que la información se presenta en una secuencia lineal ordenada, lo cual es intuitivo y eficaz para muchas aplicaciones al ofrecer beneficios para la manipulación y procesamiento de información, así como para la optimización del espacio de almacenamiento disponible (Douglass, 2020).

6. RESULTADOS

Un aspecto importante que destacar del dataset con respecto a los trabajos de Sosa-Jiménez et al. (2017), Trujillo-Romero y García-Bautista (2021) reside en el hecho de que estos autores utilizan técnicas más complejas y menos eficientes en términos de selección y procesamiento de información relevante, puesto que hay elementos en cada fotograma que no aportan información relevante para la interpretación de la LSM, adicionalmente son de uso exclusivo para señas que no requieren movimiento, sin embargo, con el uso de MediaPipe capturar la pose en lugar de la imagen, mejora significativamente la precisión y utilidad del dataset, puesto que al capturar la pose, se permite centrarse en la posición y movimiento de las manos y el cuerpo, que son cruciales para la correcta interpretación de las señas, eliminando el ruido visual y optimizando los recursos computacionales; Asimismo, en los casos anteriores, no se han publicado estos datasets y solo han quedado en estudios, en contraste, en este trabajo se está publicando el dataset, lo que facilita su acceso y utilización para futuras investigaciones.

Este dataset está disponible para su acceso y descarga pública en el siguiente enlace: [https://drive.google.com/drive/folders/1UUEnUBuoK25wFKkIj7900pl7ry0k4EP6?usp=sharing].

7. CONCLUSIONES

Se observó, que los modelos actuales emplean técnicas de recolección de datos que hacen uso de herramientas externas, con ciertas limitaciones en su aplicación como lo plantean los autores Sosa-Jiménez et al. (2017), Trujillo-Romero y García-Bautista (2021), Mejía-Peréz et al. (2022), por lo cual se presenta un dataset sin depender de herramientas especializadas de profundidad, ampliando así las posibilidades de captura para no limitar el uso exclusivo de cámaras específicas, desde otra perspectiva en el estudio Samaan et al. (2022) discute la utilización de *MediaPipe* con los 1662 *landmarks* del modelo *Holistic*, sin eliminar puntos considerados innecesarios, en contraste, nuestro enfoque elimina estos *landmarks* y añade tres puntos adicionales clave que marcan el inicio y el fin de las señas, lo cual consideramos fundamental para el análisis de la LSM, además presenta su dataset a otro idioma de señas, por lo cual, destacamos que las diferencias culturales y lingüísticas entre ese idioma y la LSM

ISSN: 2992-8338

requieren adaptaciones específicas en el modelo para capturar de manera precisa los gestos y movimientos característicos de la LSM, debido a que, cada comunidad sorda tiene su propia lengua de señas, y disponer de dataset específicos para cada una de estas lenguas permitirá un avance significativo en el ámbito de la visión artificial y el aprendizaje automático.

Como trabajo futuro, se propone implementar la normalización de la profundidad para asegurar que este factor no sea una limitación y no esté restringido a una distancia específica

8. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca y apoyo otorgado para desarrollar esta investigación en el Instituto Tecnológico de Chilpancingo.

REFERENCES

Aldrete, M. C., & Serrano, J. (2018, 29 septiembre). *LA Castro, J. P., & Cruz-Cruz, J. (2021). Experiencias de Inclusión-Exclusión de un grupo de sordos usuarios de la lengua de señas mexicana. Revista Latinoamericana de Educación Inclusiva, 15(1), 39-54. https://doi.org/10.4067/s0718-73782021000100039*

Aldrete, M. C., & Ramos, E. S. (2021). interpretación de la Lengua de Señas Mexicana en los espacios informativos. ¿Una TV sorda? Diálogos de Campo, 4(7), 41-74. https://doi.org/10.22201/enesmorelia.26832763e.2021.7.80

Cruz Aldrete, M. (2009). Reflexiones sobre la educación bilingüe intercultural para el sordo en México. Revista Latinoamericana de Educación Inclusiva, 133-145. https://sid-inico.usal.es/articulo/reflexiones-sobre-la-educacion-bilingue-intercultural-para-el-sordo-en-mexico/

Ríos-Figueroa, H. V., Sánchez-García, Á. J., Sosa-Jiménez, C. O., & Solís-González-Cosío, A. L. (2022). Use of Spherical and Cartesian Features for Learning and Recognition of the Static Mexican Sign Language Alphabet. Mathematics, 10(16), 2904. https://doi.org/10.3390/math10162904

Mejía-Peréz, K., Córdova-Esparza, D., Terven, J., Herrera-Navarro, A. M., Ramírez, M. T. G., & Ramírez-Pedraza, A. (2022). Automatic Recognition of Mexican Sign Language Using a Depth Camera and Recurrent Neural Networks. Applied Sciences, 12(11), 5523. https://doi.org/10.3390/app12115523

Sosa-Jiménez, C. O., Ríos-Figueroa, H. V., Rechy-Ramirez, E. J., Marín-Hernández, A., & Gonzalez-Cosio, A. L. S. (2017). Real-time Mexican sign language recognition. IEEE International Autumn Meeting On Power, Electronics And Computing (ROPEC). https://doi.org/10.1109/ropec.2017.8261606

Trujillo-Romero, F., & Bautista, G. G. (2021). Reconocimiento de palabras de la Lengua de Señas Mexicana utilizando información RGB-D. RECIBE, 10(2), C2-23. https://doi.org/10.32870/recibe.v10i2.209

Espejel-Cabrera, J., Cervantes, J., García-Lamont, F., Castilla, J. S. R., & Jalili, L. D. (2021). Mexican sign language segmentation using color based neuronal networks to detect the individual skin color. Expert Systems With Applications, 183, 115295. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115295

Samaan, G. H., Wadie, A. R., Attia, A. K., Asaad, A. M., Kamel, A. E., Slim, S. O., Abdallah, M. S., & Cho, Y. I. (2022). MediaPipe's Landmarks with RNN for Dynamic Sign Language Recognition. Electronics, 11(19), 3228. https://doi.org/10.3390/electronics11193228

Mejía-Pérez, A., González-Gallegos, N., Cisneros Servando, A., & López-Mendoza, A. (2022). Glosario Universitario de Lengua de Señas Mexicana. Universidad de Guadalajara. ISBN: 978-607-571-543-8

MediaPipe Solutions guide. (2023). Google For Developers. https://developers.google.com/mediapipe/solutions/guide

MediaPipe Model Maker. (2023). Google For Developers. https://developers.google.com/mediapipe/solutions/model_maker

INETV. (2020, 23 julio). Aprende palabras en lengua de señas Mexicana con María José Hernández [Vídeo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=MZOUTIjz4ac

Douglass, M. (2020). Book Review: Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and Tensorflow, 2nd edition by Aurélien Géron. Physical And Engineering Sciences In Medicine/Physical And Engineering Sciences In Medicine, 43(3), ISBN: 978-1-492-03264-9

Müller, A. C., & Guido, S. (2016). Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists. O'Reilly Media. ISBN: 978-1-449-36941-5

ISSN: 2992-8338

Application of Data Science for the Temporal Analysis of COVID-19 Mortality Data in Mexico

J. Pérez-Ortega[1], E. Velasco-Ramírez[1], N. N. Almanza-Ortega[2], C. F. Moreno-Calderón[1], A. Martínez Rebollar[1]

[1]Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca 62490, México

[2]Investigadoras e investigadores por México/CONAHCYT

e-mail: jpo_cenidet@yahoo.com.mx, m22ce055@cenidet.tecnm.mx, nelva.almanza@conahcyt.mx, D19CE059@cenidet.tecnm.mx, alicia.mr@cenidet.tecnm.mx

Abstract: Mexico was one of the five countries with the highest mortality from COVID-19 in the world. Undoubtedly, a better understanding of the behavior of the disease and its spread in our country can contribute to making better public health decisions in the face of new variants of the virus or contagious diseases. In this sense, this research analyzed daily mortality data from two official sources during the entire period of the pandemic and identified regions of Mexico with the highest mortality rates due to COVID19. The research was developed applying a Data Science methodology and clustering algorithms. One of the most relevant findings was that the northern region of Mexico City had the highest mortality rate per 100,000 inhabitants in the country.

Keywords: COVID-19 pandemic, Data Science, Mortality Waves, Epidemiology, Clustering.

1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró el 11 de marzo de 2020 que el COVID-19 pasaba de ser epidemia para convertirse en pandemia (Chauhan, 2020). Para finales del 2022, la OMS había reportado más de 733 millones de casos de contagio confirmados y más de 6.7 millones de muertes por COVID-19 a nivel mundial (Organización Mundial de la Salud, 2024). El 5 de mayo de 2023 la OMS, en un comunicado oficial, informó el fin de la pandemia, misma que había mostrado debilidades en la toma de decisiones en salud pública en algunas partes del mundo.

México, fue uno de los países que más se vio afectado por la pandemia del COVID-19 (Ibarra, 2020), por tanto, es de gran interés el contribuir presentando elementos que soporten, la toma de decisiones y la implementación de políticas públicas por parte de las autoridades correspondientes en el país, en caso de presentarse otro evento de pandemia con características similares.

La Ciencia de Datos está integrada por diferentes disciplinas, como lo son las Matemáticas, la Estadística y las Ciencias Computacionales. En los últimos años la Ciencia de Datos ha sido una ciencia emergente que ha contribuido en la toma de decisiones basadas en conocimiento extraído de grandes volúmenes de datos, (Martinez, 2021; Matthew, 2013). Particularmente, las aplicaciones de Ciencia de Datos orientadas a la pandemia por COVID-19, representan un alto número de estudios que aportan elementos relevantes para la generación de nuevo conocimiento (Callaghan, 2020; Douglass, 2020).

En la literatura especializada, se reportan estudios que identifican patrones espaciotemporales de contagio basados en el análisis geoestadístico a nivel municipal, contemplando periodos de tiempo de 12 meses (François, 2021). En trabajos similares, (Klein, 2023; Suárez, 2020), analizan la primera ola de mortalidad, mostrando a la CDMX y el Estado de México como las regiones con los primeros picos de mortalidad.

En contraste con otros trabajos, la presente investigación se posiciona dentro de las que abarcan el estudio y análisis del comportamiento de mortalidad en México, basado en datos oficiales, que cubre el periodo completo de duración de la pandemia por COVID-19. Los resultados de esta investigación aportan información relevante que puede contribuir a la toma de decisiones dentro del dominio epidemiológico en México.

La organización de este artículo es la siguiente: en la Sección 2 se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del estudio y los datos obtenidos para alcanzar el objetivo de la investigación, en la Sección 3 se reportan los resultados obtenidos con el análisis temporal de los casos de mortalidad en México, la Sección 4 contiene los resultados obtenidos con el análisis espacial mediante la implementación de un algoritmo de agrupamiento para identificar las regiones con mayores tasas de mortalidad, finalmente, las conclusiones se muestran en la Sección 5.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Metodología de Ciencia de Datos

Para el diseño y desarrollo de esta investigación, se siguió la Metodología Fundamental para la Ciencia de Datos por Lotes (BFMDS por sus siglas en inglés), la cual es una variante de la metodología FMDS propuesta por IBM (Rollins, 2015). La BFMDS es una extensión orientada al dominio de la epidemiología en las dos primeras fases de la metodología (Pérez, 2022).

ISSN: 2992-8338

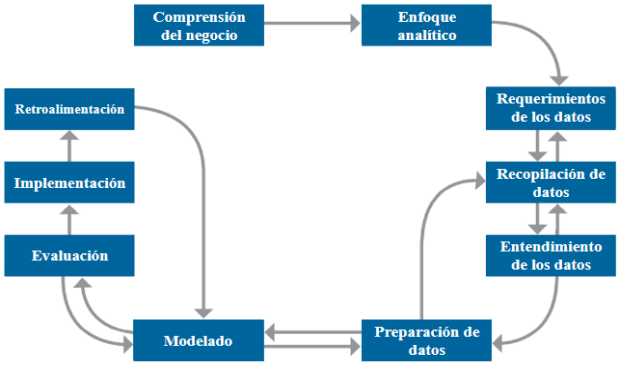


Figura 1. Esquema general de la metodología BFMDS.

La BFMDS está constituida por 10 etapas o módulos, que son: 1) Comprensión del negocio, 2) Enfoque analítico, 3) Requerimientos de los datos, 4) Recopilación de datos, 5) Entendimiento de los datos, 6) Preparación de datos, 7) Modelado, 8) Evaluación, 9) Implementación y 10) Retroalimentación. En la Figura 1 se muestra el esquema general de la metodología BFMDS. Cabe mencionar que la profundización de cada etapa es ajena a los intereses de esta investigación, por lo que únicamente se hará mención a las tareas que se consideran de mayor interés.

Durante el desarrollo de la etapa de comprensión y entendimiento del problema, se interactuó con expertos en el área de la epidemiología del Instituto Nacional de Salud Pública (INSP). Uno de los acuerdos derivados de la colaboración con los expertos en las etapas de definición del enfoque analítico y la recopilación de datos, fue el uso únicamente de fuentes oficiales de datos con acceso público y que contuvieran sus respectivos diccionarios de datos para la etapa de entendimiento de los datos.

Para la etapa de preparación de datos, se consideraron dos vertientes: una para el análisis temporal de los casos de mortalidad por COVID-19 y otra para el análisis espacial de las regiones con mayor tasa de mortalidad durante la pandemia. Los detalles particulares de cada vertiente son descritos en la Sección 3 y 4, respectivamente.

Para la etapa del modelado se realizó un análisis simple de series de tiempo, preprocesando los datos con promedios móviles con ventana de 7 días. Para el análisis espacial se implementó un algoritmo de agrupamiento. Las etapas de evaluación, implementación y retroalimentación, forman parte de las secciones de resultados, discusión y conclusiones.

2.2 Datos y sus características

Los datos utilizados para este estudio fueron recopilados de fuentes oficiales de México y son de acceso público, en la Tabla 1 se reporta la fuente y la descripción de los datos obtenidos.

Tabla 1. Fuentes de datos utilizadas

Fuente	Descripción de datos
DGIS (Dirección General de Información Sanitaria)	Registros de muertes 2020- 2021
DGE (Dirección General de Epidemiología)	Registros de COVID-19 en México 2020-2022
INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía)	Censo poblacional y de vivienda 2020
CEMECE (Centro Mexicano para la Clasificación de Enfermedades)	Catálogo internacional de enfermedades
CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social)	Indicadores de pobreza 2020
SNIM (Sistema Nacional de Información Municipal)	Registros de información municipal

Dentro de estas fuentes de datos es necesario mencionar que los datos de mortalidad por COVID-19 fueron extraídos únicamente de las fuentes correspondientes a la DGIS y a la DGE. Lo anterior motivó a realizar un análisis temporal que comparara ambas fuentes de datos para observar qué tan similares son teniendo en cuenta que ambas corresponden a los datos del mismo país.

Los datos del INEGI fueron utilizados principalmente para extraer el identificador de cada municipio de México y su respectiva población. Del CEMECE fueron extraídas las claves para identificar las defunciones por COVID-19 en el conjunto de la DGIS. Los porcentajes de pobreza de cada municipio fueron extraídos del CONEVAL y del SNIM fue obtenida el área territorial de cada municipio.

3. ANÁLISIS TEMPORAL

Para el análisis de mortalidad en series de tiempo para cada municipio y todo el país, fueron generados conjuntos de datos por separado. Para el caso del conjunto de la DGIS, fueron filtrados los registros de muertes por COVID-19 exclusivamente, y fueron aquellos que corresponden a los códigos U071 (COVID-19, virus identificado) y U072 (COVID-19, virus no identificado). Por otro lado, para el conjunto de la DGE, al ser una base de datos que incluye tanto casos de contagio como de muertes por COVID-19, fueron filtrados únicamente los registros que tenían una fecha de fallecimiento. Después, se estandarizó al formato de fecha 'yyyy-mm-dd' para facilitar su ordenamiento. Estos resultados se grafican en la Figura 2, en el eje x se muestran los días del periodo de la pandemia y en el eje y el número de casos de mortalidad. Cabe mencionar que se aplicó la técnica de medias móviles para mostrar los datos, la cual consiste en representar el valor de mortalidad de cada fecha haciendo un promedio del total de muertes en un número determinado de días, en este caso siete días.

ISSN: 2992-8338

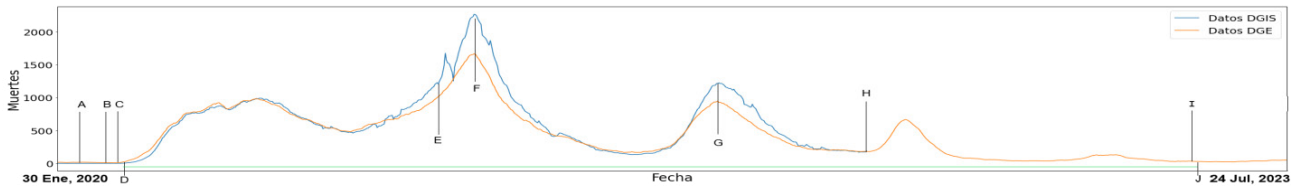


Figura 2. Series de tiempo de mortalidad de acuerdo con las dos fuentes de datos oficiales.

De acuerdo con la Figura 2, las fechas que se consideran relevantes para este trabajo son: A) La OMS declara al COVID-19 como una emergencia de salud pública de importancia internacional (30 de enero de 2020), B) Surge primer contagio por COVID-19 en México (28 de febrero de 2020), C) Se registra la primer muerte por COVID-19 en México (18 de marzo del 2020), D) el gobierno de México declara al COVID-19 como una pandemia y un gran porcentaje de trabajadores y estudiantes son enviados a sus casas en todo el país (23 de marzo de 2020), E) Comienza la vacunación sectorial en grupos de riesgo de la Ciudad de México (24 de diciembre de 2020), F) Segunda ola de mortalidad por COVID-19 en México (27 de enero de 2021), G) Tercera ola de mortalidad por COVID-19 en México (25 de agosto de 2021), H) Término de registros de mortalidad por la fuente DGIS (31 de diciembre de 2021), I) la OMS declara oficial el término de la pandemia por COVID-19 (5 de mayo de 2023), J) el gobierno de México declara oficial el término de la pandemia por COVID1-19 (9 de mayo de 2023). La línea verde bajo la gráfica corresponde a todo el periodo de pandemia por COVID-19 en México.

La línea en color azul representa los datos de la DGIS, dependencia que cuenta con los certificados de defunción de cada paciente fallecido por COVID-19. Mientras que la línea naranja representa los datos provenientes de la DGE, la cual recibe la información de los hospitales y centros de salud del país.

Ya que la fuente de DGIS no reportó los datos a partir del 2022 al momento de realizar la investigación, únicamente se trataron los datos proporcionados por la DGE a partir de dicho año, como lo muestra la línea color naranja.

Puede observarse en la Figura 2 que a pesar de que las dos líneas tienen comportamientos muy similares en las regiones en las que se presentaron las olas de mortalidad, siguen siendo valores diferentes. Los puntos marcados con la letra F y G muestran este contraste con mayor claridad.

Al comparar estos resultados con trabajos como el de (Galjak, 2023), es posible comprender que México no es el único país que presenta discordancias en sus fuentes de datos.

4. ANÁLISIS ESPACIAL

Para esta sección fue necesario aplicar algunos filtros a los datos, ya que se extrajeron únicamente los municipios con una población igual o mayor a 100,000 habitantes y se excluyeron los que no tuvieran registros de muertes por COVID-19. A lo anterior se le conoce como filtrado horizontal o de registros.

En cuanto al filtrado vertical o de atributos, únicamente fueron seleccionados los siguientes:

a) Clave municipal,
b) Clave estatal,
c) Nombre de municipio,
d) Población total,
e) Área territorial,
f) Muertes por municipio,
g) Porcentaje de población en pobreza.

La densidad poblacional fue calculada mediante el total de población de cada municipio entre su área territorial, tal como se muestra en la Expresión (2).

$$mortalidad = \frac{muertes}{población} * 100{,}000 \quad (1)$$

La densidad poblacional fue calculada mediante el total de población de cada municipio entre su área territorial, tal como se ve en (2).

$$densidad\ poblacional = \frac{población}{área\ territorial\ [km^2]} \quad (2)$$

Para el modelado se implementó el algoritmo de agrupamiento K-means (versión de Jancey) debido a su codificación sencilla y fácil compresión e interpretación de sus resultados (Pérez, 2019).

La codificación del algoritmo K-means fue realizada en el lenguaje C. Los programas se ejecutaron en un equipo con las características: (i) SO: Windows 10 Home, (ii) RAM: 8 Gigabytes; y (iii) Procesador: IntelR CoreTM i5-9300.

Al realizar el agrupamiento con el algoritmo K-means, se consideraron 18 grupos y para cada uno de los municipios/alcaldías se consideraron los atributos de densidad poblacional y porcentaje de población en pobreza. Se realizó experimentación con varios números de grupos siguiendo la regla del codo y se encontró que lo más apropiado era tomar 18 grupos.

Se ejecutaron 20 pruebas con el algoritmo y se observó que entre sus soluciones se presentaban cambios de elementos en algunos de los grupos, sin embargo, en los grupos de interés no se presentaron cambios de elementos. Los grupos de interés fueron los que tenían mayores y menores tasas de mortalidad promedio.

La Figura 3 muestra normalizados en el eje x el porcentaje de población en pobreza y en el eje y la densidad poblacional. Cada punto representa un municipio y cada cruz representa el centroide de un grupo.

ISSN: 2992-8338

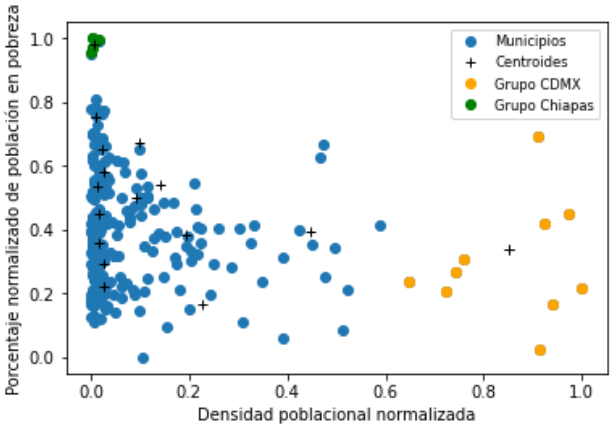


Figura 3. Agrupamiento de municipios/alcaldías.

En la Figura 3 los municipios del grupo con mayor tasa de mortalidad por COVID-19 están señalados en color anaranjado y los que presentan menor tasa de mortalidad en color verde. Al grupo con mayor tasa mortalidad por COVID 19 se le denominó Grupo CDMX, mientras que al grupo con menor tasa de mortalidad Grupo Chiapas. Los puntos en color azul representan municipios/alcaldias de grupos con valores de tasas de mortalidad que no son extremas.

En la Tabla 2 se muestran las características de cada alcaldía presente en el Grupo CDMX.

Tabla 2. Datos de mortalidad y población de las alcaldías con mayor mortalidad por COVID-19 del grupo CDMX.

Alcaldía	Mortalidad por 100 mil habitantes (2020-2021)	Densidad poblacional (población/km2)	Porcentaje de población en pobreza (%)
Iztacalco	841.62	17,595	25.2
Venustiano Carranza	825.09	13,050	30.0
Azcapotzalco	780.64	12,712	24.2
Gustavo A. Madero	749.73	13,333	33.8
Iztapalapa	706.29	16,243	43.9
Cuauhtémoc	680.54	16,542	20.9
Coyoacán	626.57	11,378	27.1
Miguel Hidalgo	544.25	9,010	13.5
Benito Juárez	492.91	16,080	7.9
Promedio	**694.18**	**13,994**	**25.1**

Al visualizar estas alcaldías en un mapa, como en la Figura 4 y 5, se observa que todas tienen cercanía geográfica, lo que muestra que el factor geográfico podría influenciar de cierta forma la tasa de mortalidad, al menos para la Ciudad de México.

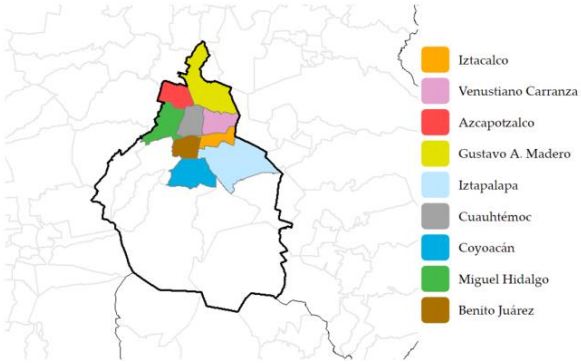


Figura 4. Distribución espacial de las alcaldías del grupo con mayor tasa de mortalidad (Grupo CDMX).

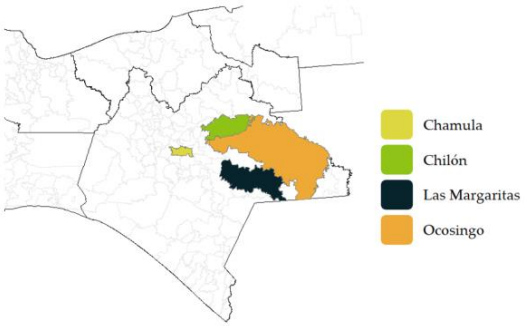


Figura 5. Distribución espacial de los municipios del grupo con menor tasa de mortalidad (Grupo Chiapas).

6. CONCLUSIONES

En esta investigación se muestra como una aplicación de Ciencia de Datos puede contribuir al conocimiento del comportamiento de la enfermedad COVID-19 en México. Dicho conocimiento posibilita que las autoridades de salud pública puedan tomar mejores decisiones ante nuevas variantes del virus o bien ante nuevas enfermedades similares.

Se sabe que existen artículos en donde se analizan datos poblaciones relacionados con la enfermedad COVID-19, sin embargo, presentan una ventana de tiempo reducida, en contraste, en esta investigación se analizan los datos generados de manera oficial durante todo el periodo de la pandemia.

El principal hallazgo de esta investigación fue la identificación de regiones de municipios/alcaldías con altas tasas de mortalidad. Por ejemplo, se encontró que un grupo de nueve alcaldías en el norte de la Ciudad de México tuvo la tasa promedio de mortalidad más alta del país, con 694 muertes por cada 100 mil habitantes. En contraste, el grupo de municipios con la menor tasa de mortalidad se encontró en estado de Chiapas.

Por otra parte, se observó que las dos fuentes de datos de mortalidad consultadas no contenían los mismos valores de mortalidad diaria del país, aún siendo ambas fuentes oficiales de México.

ISSN: 2992-8338

Finalmente, consideramos que la presente investigación puede ser continuada con aplicaciones a otras enfermedades epidemiológicas.

REFERENCIAS

Chauhan, S. (2020). Comprehensive review of coronavirus disease 2019 (COVID-19). Biomedical Journal. 43, 334-340.

Organización Mundial de la Salud (2024). WHO COVID-19 Dashboard. URL https://covid19.who.int/.

Martinez, I., Viles, E. and Olaizola, I. (2021). Data Science Methodologies: Current Challenges and Future Approaches. *Big Data Research*. 24, 100186.

Matthew, A., and Stanley, E. (2013). Data Science, Predictive Analytics, and Big Data: A Revolution That Will Transform Supply Chain Design and Management. *Journal of Business Logistics*, p. 77-84.

Ibarra, I., Cárdenas, J.A., Ruiz R.E., and Salazar, R.G. (2020). Mexico and the COVID-19 Response. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 14, e17-e18.

Callaghan, S. (2020). COVID-19 Is a Data Science Issue. *Patterns*, 1, 1-3. 435

Douglass, R., Scherer, T., and Gartzke, E. (2020). The Data Science of COVID-19 Spread: Some Troubling Current and Future Trends. *Peace Econ. Peace Sci. Pub. Pol.*; 26(3): 20200053.

François, M., Pérez, A. (2021). Spatiotemporal patterns of the COVID-19 epidemic in Mexico at the municipality level. *PeeJ*, 9, nº e12685.

Klein, B., Hartle, H., Shrestha, M., Zenteno, A., Seirra, D.; Nicolas, J.; Bento, A.; Althouse, B., and Gutierrez, B. (2023). Spatial scales of COVID-19 transmission in Mexico. *Physics and Society*, 1-33.

Suárez, V., Suárez, M., Oros, S., and Ronquillo, E. (2020). Epidemiology of COVID-19 in Mexico: From the 27th of February to the 30th of April 2020. *Revista Clínca Esplañola*, 220, 463-471.

Rollins, J.B. (2015). Foundational Methodology for Data Science. *IBM Analytics*.

Pérez, J., Almanza, N.N., Torres, K., Martínez, G., Zavala, J.K., and Pazos, R. (2022). Application of Data Science for Cluster Analysis of COVID-19 Mortality According to Sociodemographic Factors at Municipal Level in Mexico. *Mathematics*, 10, 2167.

Dirección General de Información Sanitaria (DGIS). Disponible en: http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/da_defunciones_gobmx.html.

Dirección General de Epidemiología (DGE). Datos Abiertos. Disponible en: https://www.gob.mx/salud/documentos/datos-abiertos-bases-historicas-direccion-general-de-epidemiologia.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Disponible en: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos_abiertos.

Centro Mexicano para la Clasificación de Enfermedades (CEMECE). Disponible en: https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/menu clasificacion-de-enfermedades-dgis?state=published.

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Disponible en: https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx.

Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM). Disponible en: http://snim.rami.gob.mx/.

Galjak, M., and Marinkovic, I. (2023). Discrepancies between preliminary and final COVID-19 mortality data-the case of Serbia. *Annals of Epidemiology*, 84, 41-47.

Pérez, J., Almanza, N.N., Vega, A., Pazos, R., Zavala, C. and Martínez, A. (2019). The K-Means Algorithm Evolution. *IntechOpen.* 1-22.

ISSN: 2992-8338

Review of the Fundamental Characteristics of the Electrospinning Process and its Applications in the Biomedical Field

I. Ríos Utrera*, A. Blanco Ortega*, E. Vázquez Vélez, R. Campos Amezcua*, H. Martínez Valencia****

**TecNM/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca 62490, Morelos,México. (Tel: 777-362-7770; e-mail: m23ce149cenidet.tecnm.mx).*

***Laboratorio de Espectroscopia, Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM, Av. Universidad #1000, Col. Chamilpa, Cuernavaca 62210, México. (Tel: 777- 321-4066; e-mail: velez.edna@icf.unam.mx).*

Abstract: The electrospinning process has become one of the most widely used methods for the development of polymeric nanofibers due to its simplicity, adaptability and industrial scalability. This technique allows the fabrication of nanostructured or microstructured materials with unique properties by controlling the morphology, size and distribution of the fibers, which is crucial for a wide range of applications: biomedical, textile, electronics, environmental energy and wastewater treatment, to name a few. This review provides an overview of the fundamental characteristics of the electrospinning process, starting with a description of its main components and its principle of operation. A general classification of electrospun nanofibers is also presented and the most common defects present in their morphology are identified. Furthermore, the parameters affecting the electrospinning process and how they influence the final morphology and quality of the nanofibers are described. In addition to the above, this review covers the biomedical applications of nanofibers, as well as the essential characteristics that scaffolds designed for such applications must meet.

Keywords: electrospinning, nanofibers, parameters, morphology, biomedical applications

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de electrohilado también conocido como *electrospinning*, es una técnica que utiliza un enfoque de fuerzas electrostáticas para la fabricación de fibras, facilitando el desarrollo de materiales nano o microestructurados conocidos como andamios. Este proceso se realiza a partir de una solución o fusión de polímeros, que pueden ser de origen natural, sintético o semi-sintético [1]. Dentro de las propiedades de las nanofibras electrohiladas se encuentran: su gran relación superficie/volumen, alta porosidad (típicamente 90%), peso ligero, tamaño de poro controlable, flexibilidad en las funcionalidades de la superficie, gran permeabilidad y excelentes propiedades estructurales, químicas y mecánicas [2]. Gracias a estas características y propiedades, estos materiales son adecuados para una amplia gama de aplicaciones, en las que se destacan su uso en la biomédica, particularmente en la administración de medicamentos e ingeniería de tejidos. Además de las aplicaciones mencionadas, también se utilizan en supercondensadores flexibles de estado sólido, baterías de iones de sodio y de litio, fabricación de nanotubos (por ejemplo, nanotubos de polímero, metal y óxido metálico), nanogeneradores para dispositivos de recolección de energía, recolección de energía ambiental, electrónica, tratamiento de aguas residuales y catálisis [3].

2. ELECTROHILADO

2.1 Componentes principales

La configuración para el proceso de electrohilado convencional es simple y se compone principalmente de los siguientes elementos (Fig. 1) [4]:

- Fuente de alto voltaje: fuente principal de alimentación, la cual puede ser de corriente continua o corriente alterna. Esta fuente incluye dos electrodos, uno conectado al lugar de salida de la solución (capilar) y el segundo directamente al colector.
- Bomba de infusión o elemento actuador lineal: conformado por una jeringa, éste a su vez se encarga de producir un caudal constante que transfiere la solución polimérica.
- Capilar o hilera: encargado de expulsar la solución polimérica, generalmente se utiliza una aguja hipodérmica con punta roma.
- Plato colector: tiene la función de sustrato conductor, sobre el cual las fibras son depositadas posteriormente a la evaporación del disolvente, pudiendo ser estos rotativos o estáticos.
- Cámara protectora con ventilación integrada: necesaria debido al uso de algunos disolventes utilizados, el polímero puede liberar olores nocivos.

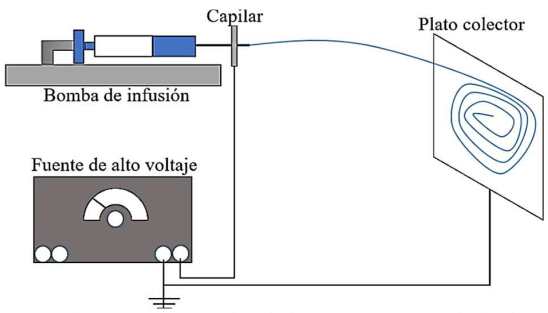


Figura 1: Diagrama esquemático de los componentes principales para el proceso de electrohilado

ISSN: 2992-8338

2.2 Principio de funcionamiento

El electrohilado se basa en un procedimiento electrohidrodinámico, en el cual las fibras se forman mediante una gota de solución electrificada, resultando en la formación de un chorro que posteriormente se estira y se alarga debido a la presencia de un campo eléctrico elevado. Para llevar a cabo este proceso, se introduce una solución polimérica en la jeringa de la bomba de infusión. Posteriormente, se aplica un voltaje elevado junto con una corriente muy baja para generar un potencial electrostático. La manera más habitual de crear este potencial es aplicando un voltaje positivo a la solución de polímero (en el extremo del capilar), mientras que el colector se conecta a tierra o se carga negativamente. No obstante, las nanofibras también se pueden electrohilar utilizando el método inverso, donde el colector se carga positivamente y el capilar se carga negativamente. Sin embargo, este enfoque se ha encontrado que es menos efectivo, tanto en términos de las propiedades de la fibra como en la productividad [5].

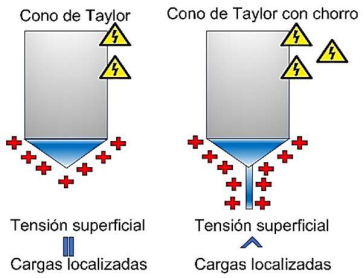


Figura 2. Ilustración esquemática de la formación del cono de Taylor

Tras la electrificación de la gota, ésta se deforma en la punta del capilar. A medida que la intensidad del campo electrostático se incrementa, la gota se alarga para crear una forma conocida como cono de Taylor. Éste es generado únicamente cuando la tensión superficial se equilibra con las cargas localizadas generadas por la fuerza electrostática (Fig. 2). Cuando la fuerza electrostática puede superar la tensión superficial, un fino chorro de polímero cargado es expulsado desde la punta del cono de Taylor. Posteriormente, el chorro tiende a descargarse, por lo que viaja en el aire hacia el colector al mismo tiempo que el disolvente se evapora [6]. Existen tres tipos de inestabilidades que el chorro puede sufrir durante este proceso, a saber: inestabilidad de Rayleigh (pequeñas fluctuaciones en la superficie del líquido debido a perturbaciones), inestabilidad de flexión (estiramiento del chorro de líquido bajo la influencia del campo eléctrico aplicado) e inestabilidad de latigazo (estiramiento extremo del chorro de líquido hasta su punto de ruptura bajo un campo eléctrico intenso) [2]. El peso molecular del polímero, el entrelazamiento de cadenas y el disolvente utilizados durante la ejecución determinan si el chorro formará una fibra continua o se dispersará en gotas. El proceso de electrohilado se puede clasificar en términos generales en cuatro etapas secuenciales:

1) Carga de la gota de polímero y formación del cono de Taylor.
2) Estiramiento del chorro cargado en línea recta.
3) Adelgazamiento del chorro debido al campo electrostático
4) Solidificación y deposición de las fibras en el colector.

2.3 Clasificación de las nanofibras

Las nanofibras fabricadas mediante el proceso de electrohilado se pueden clasificar de acuerdo con su composición química como orgánicas, sintéticas y semi-sintéticas. Sin embargo, la forma más común de clasificarlas es de acuerdo con su morfología, éstas pueden ser: a) alineadas, b) entrecruzadas, c) núcleo-cubierta, d) porosas, e) altamente porosas, f) nanofibras huecas (Fig. 3) [7].

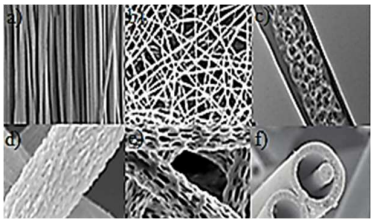


Figura 3: Morfologías comunes de las nanofibras electrohiladas

2.4 Defectos comunes en las nanofibras

Las nanofibras electrohiladas a pesar de poseer propiedades y características únicas, también pueden presentar ciertos defectos o limitantes, como la falta de uniformidad en el diámetro, porosidad no deseada, inhomogeneidades estructurales, orientación incorrecta, rotura o fracturas, e imperfecciones en la morfología. Dentro de las imperfecciones en su morfología, se pueden destacar tres tipos (Fig. 4) [8]:

a) *Bead* (Gotas/Perlas): aglomeraciones en forma de gotas de la solución polimérica a lo largo de las nanofibras que se forman durante la extrusión debido a una solidificación rápida del disolvente.
b) *Bund* (Agrupamiento): agrupamiento de múltiples fibras individuales debido a las fuerzas electrostáticas o interacciones superficiales entre ellas.
c) *Bond* (Enlace): unión o adhesión adyacente entre fibras individuales dentro de un haz o conjunto de fibras. Sin embargo, una unión fuerte de éstas indica una buena cohesión entre las fibras, lo que resulta en una estructura más robusta y resistente. Por otro lado, una unión débil puede resultar en una estructura más frágil y propensa a la desintegración.

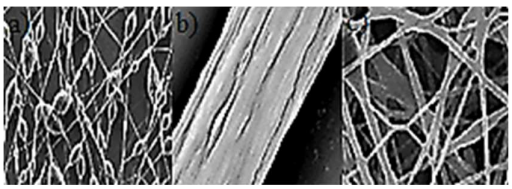


Figura 4: Defectos comunes de las nanofibras electrohiladas: a) *bead*, b) *bund*, c) *bond* [9]

2.5 Parámetros que afectan al proceso de electrohilado

Existen tres parámetros que afectan al proceso de electrohilado; parámetros de proceso, parámetros de solución y parámetros ambientales. El control de estos parámetros permite obtener fibras electrohiladas uniformes y libres de defectos, además de controlar la morfología, orientación y el tamaño de poros.

ISSN: 2992-8338

2.5.1 Parámetros de proceso

Los parámetros de proceso se encargan de ajustar y mejorar las condiciones operativas del electrohilado. Éstos incluyen: voltaje aplicado, velocidad de alimentación, distancia entre el capilar y el colector, tipo de colector y orientación del equipo.

2.5.1.1 Voltaje aplicado

El efecto del voltaje en el diámetro de las fibras electrohiladas sigue siendo un tema de debate. Usualmente, se emplean voltajes de 10 a 30 kV. Estudios sugieren que voltajes altos aumentan el diámetro y la probabilidad de gotas, además, un incremento de éste, puede generar múltiples chorros secundarios, provocando fibras no uniformes. Sin embargo, otros estudios indican que voltajes más altos producen fibras más delgadas debido a la repulsión de carga y el estiramiento del polímero [10].

2.5.1.2 Velocidad de alimentación / caudal

La velocidad de entrega de la solución de polímero y la intensidad del chorro están influenciadas por el caudal de polímero dentro de una jeringa. Aunque caudales elevados pueden aumentar la producción, también pueden afectar negativamente la morfología de las fibras, incrementando su diámetro y causando la formación de gotas debido a una elongación y secado insuficiente en el campo eléctrico. Por eso, son preferibles caudales bajos, que permitan una mejor polarización de la solución del polímero. Para obtener nanofibras uniformes, se recomienda un caudal óptimo entre 0.1 y 4.5 ml/h, dependiendo del tipo de polímero [11].

2.5.1.3 Distancia entre el capilar y el colector

La distancia entre la punta del capilar y el colector influye en la producción de fibras, además de afectar la morfología y el diámetro al determinar la intensidad del campo eléctrico. Esta distancia varía entre 5 y 20 cm y depende del tipo de disolvente utilizado. Para disolventes altamente volátiles, se emplean distancias cortas, mientras que, para solventes de baja volatilidad, se necesitan distancias mayores para una evaporación suficiente [12]. En distancias mayores, el chorro se puede estirar y elongar más, produciendo nanofibras más finas; aunque existe el riesgo de formación de gotas y rotura de fibras debido a que la magnitud del campo eléctrico se debilita. Por otro lado, distancias más cortas aumentan la intensidad del campo eléctrico, reduciendo el tiempo de evaporación del disolvente, creando fibras con diámetros reducidos o planas. La distancia al final puede determinar si se produce una electropulverización o un electrohilado.

2.5.1.4 Tipo de colector

La morfología de las fibras en el proceso de electrohilado está ligada al tipo de colector empleado, el cual puede influir en la productividad al determinar la cantidad de fibras recolectadas. Se han utilizado colectores rotativos con una velocidad de rotación específica para obtener fibras con una morfología alineada. Velocidades inferiores a 1000 rpm generan una morfología aleatoria, mientras que velocidades superiores a 500 rpm mejoran la alineación [13]. Sin embargo, velocidades mayores pueden producir fibras de menor diámetro, debido al estiramiento mecánico, aunque un estiramiento excesivo puede causar su rotura. En contraste, los colectores estáticos generan morfologías entrecruzadas, principalmente en el centro. Cabe mencionar que, el material y el recubrimiento del colector afectan la deposición de las fibras; un colector menos conductor puede repeler la fibra entrante, reduciendo la productividad [14].

2.5.1.5 Orientación del equipo

El equipo de electrohilado está conformado por tres posibles configuraciones: horizontal, vertical (de arriba hacia abajo) y vertical (de abajo hacia arriba). Sin embargo, la configuración vertical de arriba hacia abajo presenta un inconveniente y es la posibilidad de que la solución gotee desde el capilar al plato colector, y caer sobre las fibras depositadas haciendo defectuosa la superficie de las mismas e interrumpiendo el proceso. Además, el grado en que contribuyen las fuerzas eléctricas y la fuerza gravitacional varía según la configuración utilizada. La fuerza gravitacional influye en la formación del cono de Taylor, la trayectoria del chorro, el diámetro de las fibras y la eficiencia general del proceso [15].

2.5.2 Parámetros de solución

Los parámetros de solución se ocupan de los aspectos relacionados con la composición y las propiedades de la solución polimérica utilizada en el proceso de electrohilado. Éstos incluyen; concentración de la solución, disolvente, conductividad eléctrica y viscosidad.

2.5.2.1 Concentración de la solución

La concentración de la solución afecta significativamente la viscosidad de la solución y su tensión superficial. Con concentraciones altas, la viscosidad aumenta correspondientemente, lo que puede obstruir la punta del capilar y provocar un aumento en el diámetro de las fibras, e incluso la formación de microcintas en forma de hélice. Concentraciones bajas limitan el entrelazamiento de las cadenas poliméricas, resultando en la formación de fibras con formas de gotas en lugar de continuas. Además, la baja concentración conlleva a una disminución en la viscosidad y un aumento en las tensiones superficiales, lo que puede provocar electropulverización. Por lo tanto, para obtener fibras continuas con un entrelazamiento óptimo de las cadenas poliméricas, la concentración de la solución debe mantenerse en un nivel adecuado [16].

2.5.2.2 Disolvente

La elección del disolvente es un parámetro esencial para obtener fibras uniformes. Debe garantizar la completa solubilidad del polímero y tener un punto de ebullición moderado para controlar la velocidad de evaporación y solidificación del chorro [17]. Los disolventes altamente volátiles facilitan la solidificación rápida, produciendo fibras homogéneas y delgadas; no obstante, también pueden llegarse a solidificar en la punta del capilar, deteniendo el proceso. Disolventes con baja volatilidad pueden dejar las fibras húmedas, generando gotas en lugar de fibras. Entre los disolventes comúnmente utilizados se encuentran el alcohol, diclorometano, cloroformo, acetona, tetrahidrofurano, trifluoroetanol entre otros [14]. Sin embargo, el agua a pesar de ser un disolvente no es ideal, debido a su alta constante dieléctrica, lo que aumenta el voltaje necesario para un electrohilado estable. La combinación de disolventes puede ser necesaria para optimizar el proceso, aunque esto puede afectar la porosidad de las fibras.

ISSN: 2992-8338

2.5.2.3 Conductividad eléctrica

La conductividad de la solución polimérica, afecta tanto la formación del cono de Taylor como el diámetro de la fibra. Esta conductividad, está determinada por el tipo de polímero, el disolvente y la adición de sales o tensioactivos. Las soluciones altamente conductoras tienden a producir fuerzas de tracción más intensas, lo que resulta en fibras con diámetros reducidos. Sin embargo, estas soluciones pueden volverse inestables bajo un campo eléctrico fuerte, lo que genera una variación significativa en los diámetros de las fibras. Una baja conductividad puede llevar a la formación de gotas en lugar de fibras uniformes. Para aumentar la conductividad, se pueden agregar tensioactivos o sales, lo que favorece la estabilidad del cono de Taylor y una reducción en el diámetro de la fibra. En la adición de sales se emplea una concentración máxima del 2%, superar este porcentaje provoca una inestabilidad en el chorro. Además, los polímeros naturales con propiedades polielectrolíticas pueden presentar desafíos en la formación de fibras durante el electrohilado [18].

2.5.2.4 Viscosidad

La viscosidad de la solución es un factor significativo en el diámetro y la morfología de las fibras. Tanto el aumento del peso molecular como la concentración de la solución pueden incrementar la viscosidad. En viscosidades altas, las fibras tienden a tener un diámetro mayor y es menos probable la formación de gotas, lo que conduce a una apariencia más uniforme. Sin embargo, viscosidades extremadamente altas pueden obstruir la punta del capilar, impidiendo la expulsión del chorro. En viscosidades bajas, debido a la falta de entrelazamiento de las cadenas poliméricas, no se forman fibras continuas y el chorro se fragmenta en gotas. La viscosidad es un factor esencial para determinar el rango de concentraciones en el que se pueden producir fibras continuas, siendo que cada polímero tiene una viscosidad óptima que influye significativamente en la morfología de las nanofibras resultantes [19].

2.6 Parámetros ambientales

Los parámetros ambientales comprenden las condiciones del entorno de trabajo durante el proceso de electrohilado. Esto incluye factores como la temperatura y la humedad.

2.6.1 Temperatura

La temperatura para el proceso de electrohilado normalmente se realiza a temperatura ambiente. No obstante, ésta afecta la tasa de evaporación del disolvente como la viscosidad de la solución; sin embargo, esto depende de cada solución polimérica. El aumento de temperatura incrementa la tasa de evaporación del disolvente lo que a su vez disminuye la viscosidad de la solución conduciendo a la disminución del diámetro de las fibras. En cambio, las bajas temperaturas tienden a aumentar la viscosidad de la solución, promoviendo la formación de fibras con mayores diámetros [20].

2.6.2 Humedad

Dependiendo el tipo de polímero, la humedad puede afectar directamente la morfología de las fibras, su diámetro, la porosidad y la tasa de evaporación del disolvente. Una humedad elevada provoca un aumento en la porosidad de las fibras y un aumento adicional hará que los poros se conecten gradualmente entre sí. Sin embargo, un exceso de ésta puede provocar la descarga de la solución creando fibras con gotas, o llegar a producir una electropulverización. En una baja humedad, la tasa de evaporación del disolvente aumentará haciendo que el disolvente se seque más rápido, provocando un aumento en el diámetro además de poder provocar una obstrucción en el capilar. El rango de humedad adecuado para la fabricación de las fibras oscila entre el 0% y 50% [21].

3. APLICACIONES BIOMÉDICAS

3.1 Características esenciales de los andamios

Además de los parámetros que afectan al proceso de electrohiladas para la creación de nanofibras, existen otros parámetros que deben cumplir éstas para desempeñarse como andamios en aplicaciones biomédicas. No obstante, estos parámetros pueden variar según su aplicación y el tipo de tejido al que van dirigidos. Estos requisitos incluyen [22]:

- El material de fabricación debe tener una química de superficie adecuada para garantizar la biocompatibilidad, permitiendo una adhesión y proliferación celular eficiente, sin provocar respuestas adversas o inflamación causada por subproductos de degradación
- El andamio debe presentar una estructura porosa interconectada con geometría y tamaño de poro controlado. Dicha estructura debe ser capaz de mantener la estabilidad mecánica durante un periodo de tiempo para facilitar regeneración adecuada dentro del andamio.
- El armazón debe poseer propiedades mecánicas similares al tejido objetivo para promover una vascularización adecuada.

3.2 Ingeniería de tejidos

La ingeniería de tejidos tiene como principal objetivo la reparación y regeneración de órganos o tejidos. Para lograr esto, se emplean nanofibras poliméricas de origen natural o sintético, con la finalidad de facilitar el desarrollo de andamios, los cuales presentan una estructura fibrosa comparable a las matrices extracelulares. Dichos andamios funcionan para soportar la proliferación, adhesión y diferenciación celular. Los andamios en la ingeniería de tejidos se usan comúnmente para tejidos como nervios, huesos, vasos sanguíneos, cartílagos, piel, etc, debido sus características, como solubilidad en agua, biodegradabilidad, biocompatibilidad, absorción de agua e hidrofobicidad, conductividad, entre otras.

3.2.1 Regeneración de piel

La piel es el órgano más grande del cuerpo humano y tiene como funciones principales la protección, la sensación, la regulación de la temperatura corporal, la absorción, la secreción y la excreción, la respiración, el metabolismo, entre otras. La matriz extracelular de la piel está compuesta principalmente de fibras de colágeno, dispuestas en un patrón similar a una malla. Consta de dos capas distintas: la epidermis y la dermis. La epidermis tiene una menor capacidad de regeneración en comparación de la dermis, por ello, el uso de nanofibras busca facilitar la cicatrización y promover la regeneración de ambas capas, reproduciendo su composición y organización natural. Es importante destacar que las nanofibras con una morfología entrecruzada han demostrado una mejor migración de

ISSN: 2992-8338

queratinocitos y fibroblastos en comparación con las nanofibras alineadas de forma aleatoria o unidireccional [23]. Los diámetros de las fibras dentro del rango de 350 a 1100 nm han mostrado facilitar una proliferación óptima de fibroblastos, promoviendo así la formación de capas celulares bien distribuidas [24]. Se emplean biopolímeros como el alginato, quitosano, gelatina, fibronectina y fibrina para esta función, pero el colágeno destaca debido a su similitud con la estructura del tejido nativo. No obstante, carece de propiedades antibacterianas, por lo que requiere tratamiento antibacteriano.

3.2.2 Regeneración de huesos

El hueso es un tejido conectivo duro y complejo, compuesto por una matriz de hidroxiapatita y fibras de colágeno. Proporciona protección e integridad estructural a diferentes órganos internos, además contribuye en la homeostasis, almacenamiento de minerales y regulación del pH de la sangre. Aunque el tejido óseo puede repararse en fracturas leves sin necesidad de intervención quirúrgica, la ingeniería de tejido óseo ofrece una opción para tratar y regenerar lesiones más graves, como las causadas por tumores, traumas o enfermedades. Además, es una alternativa a técnicas reconstructivas como los injertos óseos autólogos y alogénicos, los cuales requieren de múltiples cirugías y conllevan el riesgo de complicaciones y traumatismos [25].

3.2.3 Regeneración nerviosa y neuronal

El sistema nervioso es un sistema complejo y vital que controla y coordina diferentes funciones del cuerpo. Sin embargo, su capacidad de regeneración es limitada, especialmente frente a lesiones significativas, lo que representa un desafío clínico en el proceso de la reparación neural. El sistema nervioso consta de dos componentes principales: el sistema nervioso central (SNC) y el sistema nervioso periférico (SNP). El SNP carece de tejido óseo y de la barrera hematoencefálica, lo que lo hace más vulnerable a traumatismos físicos, sustancias químicas y agentes biológicos, lo que conlleva a lesiones o enfermedades que provocan un deterioro del movimiento muscular y una pérdida sensorial permanente. A pesar de la variedad de tratamientos disponibles para la reparación del daño nervioso, la implementación de andamios compuestos formados por nanofibras poliméricas, ofrecen una alternativa. Su implementación se basa en proporcionar un soporte estructural para conectar los nervios lesionados y dirigir la regeneración nerviosa. Este enfoque fomenta la unión, la propagación, el crecimiento de neuritas y la regeneración axonal a lo largo de la dirección de la fibra [26]. Los andamios tridimensionales conformados por fibras alineadas tanto uniaxial como radialmente han demostrado una eficacia particular en la regeneración del daño neuronal. En contraste, los andamios bidimensionales se destinan principalmente a investigaciones centradas en la regeneración neuronal in vitro.

3.3 Administración de fármacos

Fármacos y biomoléculas (materiales bioactivos) se pueden implementar en las nanofibras para obtener un sistema de liberación controlada. Las estructuras de mallada porosa de las nanofibras las hacen funcionales para aplicaciones como: administración dérmica de fármacos, administración oral de fármacos, dispositivos de implantes in vivo, *stents* e incluso apósitos para heridas (con la finalidad de proteger de agentes bacterianos y acelerar el proceso de curación de heridas). Existen dos métodos de incorporación de fármacos con fibras electrohiladas [27]:

- Adherencia superficial: donde las fibras adsorben el fármaco en su superficie. Sin embargo, dado que el fármaco se encuentra en la superficie, se libera rápidamente, en consecuencia, solo es adecuado para la administración de fármacos en corto plazo. Las propiedades de la superficie de la fibra, propiedades del fármaco (hidrofilia, peso molecular) y el disolvente, determinan la tasa de adsorción/desorción del fármaco.
- Encapsulamiento: donde implica la disolución de los fármacos en la solución de electrohilado antes del proceso, dispersándolos directamente en las fibras. Por lo general, la morfología de las nanofibras núcleo-cubierta obtenidas mediante el electrohilado coaxial se utiliza para el encapsulamiento debido a que se evita el contacto entre el fármaco y los disolventes utilizados.

La implementación de las nanofibras en la administración de fármacos, requiere considerar factores como biodegradabilidad, la biocompatibilidad, la caracterización mecánica adecuada y la cantidad adecuada de fármaco.

4. CONCLUSIONES

El electrohilado es un procedimiento simple y flexible que permite la fabricación de fibras de tamaño nano o micro, los cuales pueden usarse en una amplia gama de aplicaciones. La morfología y las propiedades generales o específicas de las fibras electrohiladas están influenciadas por varios factores que se conocen como parámetros de electrohilado. Estos parámetros se dividen en tres categorías: parámetros de solución, parámetros de proceso y parámetros ambientales, los cuales interactúan entre sí y generan diversos efectos, por lo que es esencial ajustarlos para lograr un equilibrio. La omisión de estos parámetros puede llevar a la aparición de defectos o limitaciones en las fibras. Por otro lado, los andamios creados a partir de nanofibras han demostrado un gran potencial en aplicaciones biomédicas, específicamente en la ingeniería de tejidos (implantes vasculares) donde se busca la regeneración o reparación de órganos o tejidos. De igual forma las nanofibras se han utilizado para la implementación de sistemas de administración de medicamentos para aplicaciones terapéuticas. Sin embargo, para su aplicación en aplicaciones biomédicas, aún se necesitan mejoras en la compatibilidad biológica y las propiedades mecánicas y químicas. De igual forma, una gran limitante del proceso de electrohilado es la baja producción, por lo que todavía es necesario mejorar la implementación de redes de nanofibras en el campo clínico.

5. REFERENCIAS

[1] Guan, J., Wang, F., Li, Z., Chen, J., Guo, X., Liao, J., & Moldovan, N. I. (2011). The stimulation of the cardiac differentiation of mesenchymal stem cells in tissue constructs that mimic myocardium structure and biomechanics. Biomaterials. (Vol. 32, no 24, p. 5568-5580). https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.04.038

[2] Baji, A., Mai, Y. W., Wong, S. C., Abtahi, M., & Chen, P. (2010). Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. In Composites Science and Technology (Vol. 70, Issue 5, pp. 703–718). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.01.010

ISSN: 2992-8338

[3] Maliszewska, I., & Czapka, T. (2022). Electrospun Polymer Nanofibers with Antimicrobial Activity. In Polymers (Vol. 14, Issue 9). MDPI. https://doi.org/10.3390/polym14091661

[4] Kulkarni, A.; Bambole, V.; Mahanwar, P. (2010). Electrospinning of polymers, their modeling and applications. Polym. Plastics Technol. Eng. (Vol. 49, no 5, p. 427-441). https://doi.org/10.1080/03602550903414019

[5] Wu, C. M., Chiou, H. G., Lin, S. L., & Lin, J. M. (2012). Effects of electrostatic polarity and the types of electrical charging on electrospinning behavior. Journal of Applied Polymer Science, (Vol. 126, no S2, p. E89-E97). https://doi.org/10.1002/app.36680

[6] Lannutti, J., Reneker, D., Ma, T., Tomasko, D., & Farson, D. (2007). Electrospinning for tissue engineering scaffolds. Materials Science and Engineering: C, (Vol. 27, no 3, p. 504-509). https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.05.019

[7] Abdulhussain, R., Adebisi, A., Conway, B. R., & Asare-Addo, K. (2023). Electrospun nanofibers: Exploring process parameters, polymer selection, and recent applications in pharmaceuticals and drug delivery. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 90. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.105156

[8] Guo, Y., Wang, X., Shen, Y., Dong, K., Shen, L., & Alzalab, A. A. A. (2022). Research progress, models and simulation of electrospinning technology: a review. In Journal of Materials Science (Vol. 57, Issue 1, pp. 58–104). Springer. https://doi.org/10.1007/s10853-021-06575-w

[9] Song, Z., Chiang, S. W., Chu, X., Du, H., Li, J., Gan, L., & Kang, F. (2018). Effects of solvent on structures and properties of electrospun poly (ethylene oxide) nanofibers. Journal of Applied Polymer Science, (Vol. 135, no 5, p. 45787). https://doi.org/10.1002/app.45787

[10] Sirelkhatim, N., Lajeunesse, D., Kelkar, A. D., & Zhang, L. (2015). Antifungal activity of amidoxime surface functionalized electrospun polyacrylonitrile nanofibers. Materials Letters, 141, 217–220. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.090

[11] Zhang, C., Yuan, X., Wu, L., Han, Y., & Sheng, J. (2005). Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats. European Polymer Journal, 41(3),423–432. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.027

[12] Yang, Y., Jia, Z., Li, Q., Hou, L., & Guan, Z. (2008). Electrospun uniform fibres with a special regular hexagon distributed multi-needles system. Journal of Physics: Conference Series, 142. https://doi.org/10.1088/1742-6596/142/1/012027

[13] Ingavle, G. C., & Leach, J. K. (2014). Advancements in electrospinning of polymeric nanofibrous scaffolds for tissue engineering. In Tissue Engineering - Part B: Reviews (Vol. 20, Issue 4, pp. 277–293). Mary Ann Liebert Inc. https://doi.org/10.1089/ten.teb.2013.0276

[14] Uhljar, L. É., & Ambrus, R. (2023). Electrospinning of Potential Medical Devices (Wound Dressings, Tissue Engineering Scaffolds, Face Masks) and Their Regulatory Approach. In Pharmaceutics (Vol. 15, Issue 2). MDPI. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15020417

[15] Chanunpanich, N., Lee, B., & Byun, H. (2008). A study of electrospun PVDF on PET sheet. Macromolecular Research, 16(3), 212–217. https://doi.org/10.1007/BF03218855

[16] Son, W. K., Youk, J. H., Lee, T. S., & Park, W. H. (2004). The effects of solution properties and polyelectrolyte on electrospinning of ultrafine poly(ethylene oxide) fibers. Polymer, 45(9), 2959–2966. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.03.006

[17] Haider, A., Haider, S., & Kang, I. K. (2018). A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. In Arabian Journal of Chemistry (Vol. 11, Issue 8, pp. 1165–1188). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015

[18] Al-Abduljabbar, A., & Farooq, I. (2023). Electrospun Polymer Nanofibers: Processing, Properties, and Applications. In Polymers (Vol. 15, Issue 1). MDPI. https://doi.org/10.3390/polym15010065

[19] Bae, H. S., Haider, A., Selim, K. M. K., Kang, D. Y., Kim, E. J., & Kang, I. K. (2013). Fabrication of highly porous PMMA electrospun fibers and their application in the removal of phenol and iodine. Journal of Polymer Research, 20(7). https://doi.org/10.1007/s10965-013-0158-9

[20] Casper, C. L., Stephens, J. S., Tassi, N. G., Chase, D. B., & Rabolt, J. F. (2004). Controlling surface morphology of electrospun polystyrene fibers: Effect of humidity and molecular weight in the electrospinning process. Macromolecules, 37(2), 573–578. https://doi.org/10.1021/ma0351975

[21] Flores-Rojas, G. G., Gómez-Lazaro, B., López-Saucedo, F., Vera-Graziano, R., Bucio, E., & Mendizábal, E. (2023). Electrospun Scaffolds for Tissue Engineering: A Review. In Macromol (Vol. 3, Issue 3, pp. 524–553). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/macromol3030031

[22] Sun, L., Gao, W., Fu, X., Shi, M., Xie, W., Zhang, W., & Chen, X. (2018). Enhanced wound healing in diabetic rats by nanofibrous scaffolds mimicking the basketweave pattern of collagen fibrils in native skin. Biomaterials science, (Vol. 6, no 2, p. 340-349). https://doi.org/10.1039/C7BM00545H

[23] Kumbar, S. G., Nukavarapu, S. P., James, R., Nair, L. S., & Laurencin, C. T. (2008). Electrospun poly (lactic acid-co-glycolic acid) scaffolds for skin tissue engineering. Biomaterials, (Vol. 29, no 30, p. 4100-4107). https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.06.028

[24] Shin, S. H., Purevdorj, O., Castano, O., Planell, J. A., & Kim, H. W. (2012). A short review: Recent advances in electrospinning for bone tissue regeneration. In Journal of Tissue Engineering (Vol. 3, Issue 1, pp. 1–11). SAGE Publications Ltd. https://doi.org/10.1177/2041731412443530

[25] Entekhabi, E., Haghbin Nazarpak, M., Shafieian, M., Mohammadi, H., Firouzi, M., & Hassannejad, Z. (2021). Fabrication and in vitro evaluation of 3D composite scaffold based on collagen/hyaluronic acid sponge and electrospun polycaprolactone nanofibers for peripheral nerve regeneration. Journal of Biomedical Materials Research Part A, (Vol. 109, no 3, p. 300-312) https://doi.org/10.1002/jbm.a.37023

[26] Hurtado, A., Cregg, J. M., Wang, H. B., Wendell, D. F., Oudega, M., Gilbert, R. J., & McDonald, J. W. (2011). Robust CNS regeneration after complete spinal cord transection using aligned poly-l-lactic acid microfibers. Biomaterials, 32(26), 6068–6079. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.05.006

[27] Lian, S., Lamprou, D., & Zhao, M. (2024). Electrospinning technologies for the delivery of Biopharmaceuticals: Current status and future trends. In International Journal of Pharmaceutics (Vol. 651). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.12

ISSN: 2992-8338

AI for Involuntary Movements Characterization: Preliminary Results

Héctor Panohaya Salcedo*. Raúl Pinto Elías. Andrea Magadán Salazar***. Nimrod González Franco******

Department of Computational Science, National Technological Institute of Mexico / National Center of Research and Technological Development, Cuernavaca, Morelos, 62490, Mexico

**(e-mail: m23ce006@cenidet.tecnm.mx).*
***(e-mail: raul.pe@cenidet.tecnm.mx).*
****(e-mail: andrea.ms@cenidet.tecnm.mx).*
*****(e-mail: nimrod.gf@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: Involuntary movements, which often mirror facial expressions, present a significant challenge in characterizing various movement disorders. This study explores the intersection of involuntary movements and facial expressions, focusing on accurate identification of regions of interest (ROI) and facial landmarks. We propose a methodology to improve landmark and ROI stability, which is beneficial for accurately identifying expressions in individuals with neurological disorders. Our focus is on assessing landmark stability using Euclidean distance measurements, particularly for distorted expressions, which are an important aspect in the study of various disorders. We found that filter type and buffer size influence landmark stability, with median filters showing improvements of up to 16.9% over the baseline. This research highlights the critical role of datasets in precise facial analysis and in applying AI techniques to the analysis of involuntary movements in neurological disorders.

Keywords: *Involuntary movement analysis. (MEs, ME) Micro expressions. (AU, AUs) Action Units*.

1. INTRODUCTION

Voluntary movement control, essential for human motion, relies on the sensation of intent and the belief that one's movements are self-initiated, enhancing a sense of control and voluntariness (Virameteekul & Bhidayasiri 2022). However, some people might experience a disrupted sense of will or agency, causing movements that appear voluntary but are actually unexpected and involuntary (Jankovic & Tolosa 2007; American Psychiatric Association 2022; Virameteekul & Bhidayasiri 2022). Additionally, these involuntary movements are closely associated with a broad spectrum of movement disorders (Jankovic & Tolosa 2007; Kandel *et al*. 2013; American Psychiatric Association 2022; Virameteekul & Bhidayasiri 2022). These disorders can be broadly classified into hypokinetic disorders, such as Parkinson's disease, characterized by reduced or slowed movement, and hyperkinetic disorders, exemplified by conditions like Huntington's disease, dystonia, and hemiballismus (Jankovic & Tolosa 2007; American Psychiatric Association 2022). In these disorders, involuntary movements are not only unintended but also frequently occur in contrast to an individual's voluntary control, highlighting the complex relationship between voluntary movement and neurological dysfunction (Jankovic & Tolosa 2007; Kandel *et al*. 2013; American Psychiatric Association 2022; Virameteekul & Bhidayasiri 2022). Jankovic & Tolosa (2007) propose a classification of movements into four categories to differentiate involuntary movements, which share characteristics with other types of movement, from voluntary ones. These categories are: (1) Voluntary, including intentional and externally triggered movements; (2) Semi-voluntary, such as those induced by internal sensory stimuli or unwanted sensations/compulsions; (3) Involuntary, including non-suppressible movements like reflexes, and suppressible ones like tics; (4) Automatic, which are learned motor behaviors performed without conscious effort. This classification helps in understanding the spectrum of human motion and its disorders.

Involuntary movements, often described as rapid, abrupt, and recurrent, are irregular, nonrhythmic manifestations that can closely resemble facial expressions (Jankovic & Tolosa 2007; American Psychiatric Association 2022). Repetitive movements in tardive dyskinesia closely mirror natural facial expressions, similar to the abrupt and rapid movements observed in tics (Ekman & Friesen 2003; Jankovic & Tolosa 2007; American Psychiatric Association 2022). This similarity also extends to other involuntary actions such as rhythmic motor stereotypies and chorea, which mimic continuous expressive gestures (Ekman & Friesen 2003; American Psychiatric Association 2022; Leisman & Sheldon 2022). Dystonia, with its sustained muscle contractions causing distorted postures, and myoclonus, marked by sudden movements, also reflect the complexities of facial expressions (Ekman & Friesen 2003; Kurlan 2005; Jankovic & Tolosa 2007; Kandel *et al*. 2013; American Psychiatric Association 2022; Leisman & Sheldon 2022; Virameteekul & Bhidayasiri 2022).

Understanding involuntary movements has led to the use of modern computational technology for their analysis. Advances in automatic analysis of facial actions, as highlighted by Martinez *et al*., in 2019, provide methods to categorize facial

ISSN: 2992-8338

expressions using tools like the Facial Action Coding System (FACS). These technologies enable detailed analysis of both micro (ME, MEs) and macro expressions and help identify specific action units (AUs), crucial for assessing emotional expressions. Originating from Dr. Paul Ekman's research, these AUs offer a systematic approach to decoding facial movements, improving the field of emotion recognition and non-verbal communication (Ekman & Friesen 2003; Vilchis *et al*. 2023).

2. RELATED WORK

Drawing from the similarities between involuntary movements and other types of movements, including reflexes, facial expressions, and shared characteristics among different movement disorders (Ekman & Friesen 2003; Kurlan 2005; Jankovic & Tolosa 2007; Kandel *et al*. 2013; American Psychiatric Association 2022; Leisman & Sheldon 2022; Virameteekul & Bhidayasiri 2022), it becomes relevant to investigate the models and techniques for characterizing facial expressions, MEs, and the current state of the art involving techniques applied to involuntary movement detection. The specific challenges related to detecting and analyzing these expressions and movements will be detailed in the following sections. This exploration could potentially advance understanding of complex neurological conditions and improve diagnostic methods in this field.

2.1 Macro Expression Analysis

Expression recognition, which aims to identify basic human expression categories like anger, disgust, fear, happiness, sadness, and surprise, is met with various challenges despite the diverse approaches applied to its detection. These challenges include dealing with the subtlety and complexity of facial movements, variations in expressions across different individuals and cultures, issues related to image quality and lighting, facial occlusion or obscured features, and the ethical considerations surrounding privacy and data usage (Ekman & Friesen 2003; Reyes Ortiz Jorge *et al*. 2012; Sophie Brügge *et al*. 2023). In the 2022 study by Zhang *et al*., presented at the 2022 ABAW (Affective Behavior Analysis in-the-wild) Competition, their transformer-based multimodal framework in Human-Computer Interaction (HCI) stood out. This model integrated visual, auditory, and textual features, achieving a 49.9% F1 score in AU detection and 35.9% in facial expression recognition (EXPR), and led in both categories. The abstraction studies emphasized the critical importance of each multimodal component, where removing specific elements resulted in significant drops in F1 scores, highlighting the effectiveness of their methodology in naturalistic affective behavior analysis and its possible application for the detection of involuntary movements.

In their 2020 study, Fatchan *et al*. investigated facial expression recognition using Support Vector Machine (SVM) and Neural Network algorithms, achieving accuracies of 87% and 85%, respectively. The research highlighted challenges such as lighting and noise that affect accuracy and emphasized the importance of higher-dimensional feature vectors for more precise emotion detection from photos. These findings suggest potential applications in detecting expressions linked to mental disorders and offer insights into overcoming technical barriers through optimized feature selection and algorithm use.

The study conducted by Murtaza *et al*., in 2019, addresses the problem of facial emotion recognition using Convolutional Neural Networks (CNN) and Recurrent Neural Networks (RNN) in order to track and locate facial expressions on the JAFFE dataset. The S-Hex method was chosen for its effectiveness in representing and analyzing facial expressions in a structured manner, contributing to improved emotion recognition in the context of neurological disorders. They achieved an 88% classification accuracy by incorporating the Surface Hexagon (S-Hex) technique to capture subtle facial features. The authors noted that while this method was successful, challenges such as facial landmark jittering movements like eyes, nose, mouth, cheeks etc. must be further investigated.

2.2 Micro Expression Analysis

Identifying micro expressions presents specific challenges, as these expressions typically last only a fraction of a second, much shorter than most facial expressions which last more than a second. MEs are usually embedded in movement, often in facial movements that are part of speech. In addition, they are usually immediately followed by a masking facial expression. Micro expressions do not last long enough to determine which facial expression was interrupted, however, the fragments of facial expression that manage to be observed can be used to estimate which facial expression has been masked (Ekman & Friesen 2003).

ME (micro expression) spotting, which aims to locate the apex frame positions of MEs from long videos, is the initial and crucial step in ME analysis. MEs, characterized as unusual facial dynamics with movement patterns that diverge from typical expressions, can thus be regarded as outliers in the feature space of these long videos. The 2021 study by Cao *et al*., centers on leveraging this characteristic for the advanced detection of MEs. Utilizing the FACS the team employs facial landmarks to construct four triangles in the human face, specifically in areas highly related to MEs. These triangles are fundamental in representing the geometric strain on facial skin due to muscle motion when an ME occurs. To capture the comprehensive dynamics of MEs, the method combines the extraction of geometric features, using Euclidean distance as shown in Eq. (1), with texture features derived from the Histogram of Gradient. The combination of geometric analysis and statistical modeling effectively identifies MEs as anomalies in long-duration videos. A significant achievement of this model is its capability to process 185 frames per second, nearly meeting the real-time processing requirements for videos recorded at 200 frames per second. This efficiency in processing speed underscores the practical applicability of the method in real-world scenarios where rapid and accurate detection of MEs is crucial.

$$d(X,Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2} \qquad (1)$$

In the field of facial expression and micro expression detection, many studies typically utilize high-dimensional

ISSN: 2992-8338

feature spaces for classification tasks. However, the model developed by Guermazi, Ben Abdallah and Hammami, in 2021 for ME recognition adopted a streamlined approach to feature extraction and classification. It starts by preprocessing video sequences into cuboids (a 3D matrix of composed of video segments) of different sizes, determined by pyramid levels. These cuboids are then transformed into 2D images using an accordion representation, which alternates columns from video frames in a unique sequence in the 2D matrix. A key aspect of the model is the use of Local Binary Patterns (LBP) for feature extraction from these 2D arrays. The final step involves reducing the dimensionality of the feature space using an embedded feature selection method based on Random Forests (RF). This method selects the most discriminating features, resulting in a compact and efficient feature space. Experimentally, the model achieves an accuracy rate of up to 81.38% in the CASME II dataset. Its strength is its ability to maintain effective performance while utilizing a reduced number of features (from 4720 to 79 in the best scenario), distinguishing it from other methods that rely on high-dimensional feature spaces. This efficiency in feature utilization, combined with high accuracy, highlights the model's effectiveness in facial ME recognition.

The work carried out by Shahar and Hel-Or, in 2019 introduces a method for detecting and classifying MEs by focusing on changes in facial color due to blood flow, a less controllable aspect than facial movements. Their model, using a two-layer LSTM (Long Short-Term Memory), evaluates these color changes and classifies emotion types, showing significant improvement over traditional movement-based methods. The system achieves an accuracy of 64.33% on CASME II, 63.41% on SMIC, and a performance of over 90% on CASME II. This approach is particularly effective due to its focus on facial color.

2.3 Involuntary Movement Detection

The detection of involuntary movements, particularly in patients with neurological disorders, is a vital area of research with significant implications for diagnosis and treatment. The 2019 study by Larrazabal, Cena and Martinez employs an approach that focuses on tracking head movements, applying advanced video-oculography techniques. Their method, rooted in advanced computer vision, utilized cascaded convolutional neural networks to accurately estimate the coordinates of eye corners, which serve as crucial indicators of head motion. The proposed model reached its optimal performance under specific technical configurations, including a learning rate of 0.0001, batch size of 16, and a patch size of 140x140 pixels for the second network, supplemented by a dropout rate of 0.3. Despite their progress, the researchers encountered ongoing challenges such as jittering in landmarks and the insufficiency of annotated data for certain movement phenomena, leading them to employ data augmentation techniques.

Among the various existing approaches for the detection of involuntary movements, the 2021 study by van Heugten Breurkes and Green is notable for its focus on the identification of rapid and brief movements, specifically categorized as facial tics. The research addresses a crucial aspect in the diagnosis and monitoring of neurological disorders, using advanced video processing techniques to detect these subtle but significant motion abnormalities. Their approach uses Histogram of Oriented Gradients filters and a linear Support Vector Machine for face detection, and tracks facial movements by monitoring changes in the area and coordinates of facial features identified through 68 facial landmarks. Focusing on the eyes, eyebrows, and mouth - regions commonly affected by tics - this method labels short-duration significant movements as facial tics. Tested under controlled conditions, it achieved a 90% accuracy rate but faced a 66% false positive rate for mislabeling long-duration movements as tics. Despite some limitations, including a shortage of extensive public datasets for facial tics, the method shows promise in the field of facial movement detection, outperforming similar emotion detection methods with a higher accuracy and lower false positive rate for neutral expressions.

One of the key motivations driving the development of AI systems for recognizing movement patterns categorized as involuntary is their potential for real-world applications. These systems could be employed in diverse settings such as homes, clinics, schools, and other environments. For such applications to be effective, it is crucial that the information these AI systems provide is interpretable by specialists across various fields. In this context, the study by Tang *et al*., in 2022 focusses on developing a model capable of operating in terms easily interpretable by clinical personnel. This study introduces T-Net, an architecture that employs AUs as key features for classification in its model. T-Net combines techniques of temporal detection and segmentation to analyze untrimmed videos, standing out for its ability to operate on clinically interpretable features, a notable advantage over systems that rely exclusively on deep features extracted from raw videos. The dataset used in this study was particularly specialized and relevant. It involved the analysis of facial motor tics in a 12-year-old male diagnosed with Tourette Syndrome. It consists of 12 videos, each 15 minutes long, over four visits, during which the participant engaged in various activities, ranging from sitting motionless to engaging in conversations about tics. All videos were recorded using a smartphone at 30 FPS, and later, experts annotated the temporal tic windows using the open-source software VIA3. T-Net in this study, which uses AU intensities as features for classification, achieved an average precision (AP) of 43.73% in 'leave-one-video-out' (LOVO) cross-validation tests. This performance favorably compares with other methods and highlights its clinical utility. This approach not only provides accurate detection but also offers valuable interpretations for medical professionals, as the AUs reflect the spatial patterns of essential facial muscle movements in tic identification.

3. PROPOSED METHODOLOGY

The stages of a computer vision system described in Figure 1 applied to facial expression processing include: "Image acquisition" where facial images are collected; "Pre-processing" which transforms and aligns images for consistency; "Segmentation" that isolates and delineates specific facial elements; "Representation and description" extracting and detailing facial features; and finally,

ISSN: 2992-8338

"Recognition and interpretation" using processed information alongside a comprehensive "Knowledge base" to accurately identify and classify facial expressions.

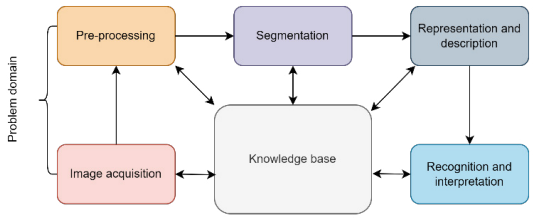


Figure 1 Stages of a VA system adapted from (Reyes Ortiz Jorge *et al*. 2012; Vilchis *et al*. 2023).

In the field of computer vision for facial expression analysis, the accurate placement of the region of interest (ROI) and facial landmarks is crucial. This significance is emphasized in a range of studies including those by Larrazabal, Cena and Martinez (2019); Murtaza *et al*. (2019); Shahar and Hel-Or, (2019); Fatchan *et al*. (2020); Cao *et al*. (2021); Guermazi, Ben Abdallah and Hammami, (2021); van Heugten Breurkes and Green, (2021); Tang *et al*. (2022); and Zhang *et al*. (2022). These initial steps are crucial for subsequent feature extraction processes. Specifically, the methodologies employed in the studies by Larrazabal, Cena and Martinez (2019) and van Heugten Breurkes and Green (2021) rely heavily on precise tracking of facial landmarks. Similarly, the approaches in the studies by Shahar and Hel-Or (2019) , Fatchan *et al*. (2020), Guermazi, Ben Abdallah and Hammami (2021), and Murtaza *et al*. (2019) begin with face localization and region of interest (ROI) extraction, leading to feature extraction. Particularly, the 2021 study by Cao *et al*. integrates both geometric and textural features, with the geometric aspects significantly influenced by ROI delineation and landmark tracking. This emphasizes the critical role that accurate ROI and landmark identification play in the successful analysis and interpretation of facial expressions. The methodology depicted in Figure 2 aims to stabilize both the ROI and landmarks to enhance feature extraction and reduce the inherent instability in these processes. This approach seeks to minimize the negative impact that variability in ROI and landmark detection could have on the final results, particularly in identifying facial expressions in individuals with neurological disorders.

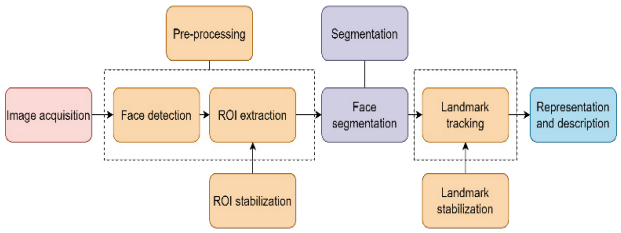


Figure 2 Proposed methodology.

4. EXPERIMENTATION

The experimentation involved applying median filtering and moving average to the points defining both the region of interest and the landmarks on the segmented image. OpenCV's deep neural network module was used for face detection, while Dlib with its pre-trained 68-point model was employed for landmark placement. OpenCV face detection parameters were set with a confidence threshold of 0.99 to minimize false positives. For landmark tracking, only the image segment containing the face, extended by a 20% zoom factor as represented in the Figure 3, was processed. The obtained landmarks are referenced to the original image size. This approach was tested on the Toronto NeuroFace Dataset (Bandini *et al*. 2021), which provides over 3,300 video frames of orofacial gestures performed by individuals with orofacial impairment due to neurological disorders.

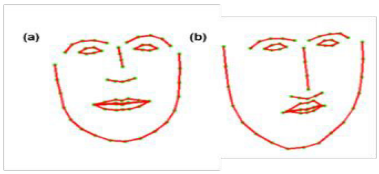


Figure 3 Graphical representation of facial landmarks. (a) Neutral expression. (b) Distorted expression.

During the implementation process, it was observed that Dlib handles symmetric faces well within expected parameters. However, challenges arise when processing expressions that deviate from symmetry, as shown in Figure 4. For neutral facial expressions, Dlib's performance aligns with expectations, accurately placing landmarks in accordance with the ground truth, as depicted in Figure 5. This suggests that Dlib's facial landmark detection algorithm is well-optimized for standard, symmetric expressions, which is crucial for reliable feature extraction in facial expression analysis. However, further refinement may be necessary to ensure consistent landmark detection in asymmetric expressions.

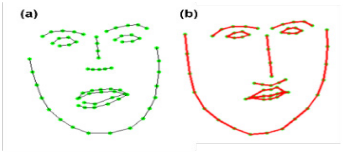


Figure 4 Graphical representation of facial landmarks in a distorted expression. (a) Ground truth. (b) Dlib result.

The evaluation focused on frames depicting a person with a neutral expression and frames showing the peak of an expression. The similarity assessment between the point sets was conducted using the average Euclidean distance measurement. A total of 9 cases with distinct configurations are described in Table 1 to Table 4.

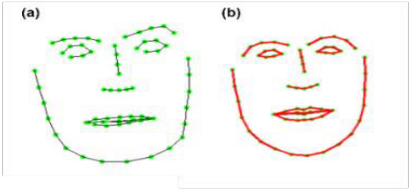


Figure 5 Graphical representation of facial landmarks in a neutral expression. (a) Ground truth. (b) Dlib result.

ISSN: 2992-8338

For neutral expressions, applying a filter to stabilize the landmarks—as shown in Table 1—revealed that adding a filter leads to a decrease in similarity in terms of distance. This highlights once again that Dlib performs notably well in tracking landmarks in neutral and symmetrical expressions. In the context of facial landmark stabilization during the tracking of neutral expressions, we note distinct variations when filters are applied, benchmarked against the unfiltered baseline. The median filter with a 5-frame buffer elevated the average Euclidean distance by 22.95%. Similarly, implementing a moving average filter with the same buffer size augments the distance by 25.52%. As the buffer size was extended to 10, the median filter increases the distance by 36.17%, and the moving average filter causes an increase of 39.94%.

Table 1. Neutral expression: Avg. distance w/o filter in ROI

	Filter type		
Buffer size	NA	Median	Moving average
0	6.1901355	NA	NA
5	NA	7.610798012	7.769840025
10	NA	8.428977145	8.662295899

Table 2 reveals that when a median filter with a 5-frame buffer was applied to the ROI of distorted expressions, it increased the average distance by 25.9%, whereas a moving average filter increased it by 26.8%. However, increasing the buffer size to 10 frames reduced the average distance by 16.9% for the median filter and 4.2% for the moving average filter. This suggests that larger buffer sizes are more effective at stabilizing landmarks in distorted expressions, though they require more memory and can lead to discrepancies between the observed and recorded expressions.

Table 2. Distorted expression: Avg. distance w/o filter in ROI

	Filter type		
Buffer size	NA	Median	Moving average
0	10.48699036	NA	NA
5	NA	13.20469308	13.29905017
10	NA	8.707774495	10.04568779

In the analysis of neutral expressions where both the ROI and landmarks are concurrently filtered, as shown in Table 3, the application of a median filter with a buffer size of 5 frames increases the average distance by 27.22% compared to the baseline, while a moving average filter leads to a 32.17% increase. For a buffer size of 10 frames, the median filter increases the average distance by 39.34%, and the moving average filter increases it by 39.22 %.

Table 3. Neutral expression: Avg. distance with filtering in ROI /Landmarks

	Filter type	
Buffer size	Median	Moving average
5	7.875248029	8.181303482
10	8.625810537	8.617883461

In the analysis of distorted expressions with concurrent filtering of both ROI and landmarks, as shown in Table 4, significant variations in average distance were noted compared to the baseline without filters. When a median filter with a buffer of 5 frames is used, the average distance increases by 44.2%. Employing a moving average filter under the same buffer conditions resulted in a 31.8% increase in average distance. Increasing the buffer size to 10 frames and applying a median filter, the average distance showed a reduction of 10.0%. In contrast, a moving average filter with a 10-frame buffer increased the average distance by 6.4%, highlighting the importance of the correct selection of buffer size and type.

Table 4. Distorted expression: Avg. distance with filtering in ROI/Landmarks

	Filter type	
Buffer size	Median	Moving average
5	15.10978746	13.84607817
10	9.445890156	11.2112993

5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

This study emphasizes the importance of precise facial landmark placement and region of interest identification in facial expression analysis. Experimentation shows that while filters stabilize landmarks, they affect detection accuracy, especially in asymmetric expressions.

Our results indicate that the choice of filter type and buffer size can significantly influence landmark stability. In this study, the application of filters on distorted expressions, relevant for studying various disorders, achieved improvements of up to 16.9% compared to the baseline (unfiltered processing) using median filters. However, filtering is not universally beneficial, as evident in the results of applying filters to neutral expressions. While distorted expressions may benefit, this is not equally applicable to more symmetrical expressions.

In research that requires precise facial geometry processing, such as the studies by Larrazabal, Cena and Martinez (2019) and van Heugten Breurkes and Green (2021), the use of filtering can have a positive impact and should be considered. For studies where landmark tracking is not the central focus but can still provide benefits, such as those conducted by Murtaza *et al*. (2019), Shahar and Hel-Or (2019), Cao *et al*. (2021), and Guermazi, Ben Abdallah and Hammami (2021), stabilizing both the region of interest (ROI) and landmarks could prove advantageous.

The results from various studies analyzed here emphasizes the importance of datasets and their availability to ensure accurate characterization of phenomena, as seen in the study that produced the dataset used in this work (Bandini *et al*. 2021). The models applied to involuntary movement detection (Larrazabal *et al*. 2019; van Heugten Breurkes & Green 2021; Tang *et al*. 2022) show similarities with processes for detecting facial expressions not associated with disorders, suggesting the feasibility of applying these techniques and preprocessing methods to the study of involuntary movements caused by various disorders.

ISSN: 2992-8338

This research opens avenues for exploring additional filters on various datasets, examining their impact on facial recognition models. Ethical implications arise regarding the privacy and consent of using sensitive facial data, emphasizing the need for robust privacy-preserving methods like those proposed by Brügge *et al.*(2023). Expanding this work will deepen our understanding of the effects of these filters on facial landmark stability and accuracy. The main limitation is its specific dataset applicability, which may not generalize across diverse populations. Nonetheless, the potential clinical applications are significant, as automated detection can streamline assessments in patients with neurological conditions, aiding in therapy monitoring and disease progression tracking. Future research should validate these approaches in varied clinical settings to ensure broader applicability.

ACKNOWLEDGMENT

(Portions of) the research in this paper uses the NeuroFace Database collected by Dr. Yana Yunusova and the Vocal Tract Visualization and Bulbar Function Lab teams at UHN-Toronto Rehabilitation Institute and Sunnybrook Research Institute respectively, financially supported by the Michael J. Fox Foundation, NIH-NIDCD, Natural Sciences and Engineering Research Council, Heart and Stroke Foundation Canadian Partnership for Stroke Recovery and AGE-WELL NCE.

REFERENCES

American Psychiatric Association, 2022, *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders*, American Psychiatric Association Publishing.

Bandini, A., Rezaei, S., Guarin, D.L., Kulkarni, M., Lim, D., Boulos, M.I., Zinman, L., Yunusova, Y. & Taati, B., 2021, 'A New Dataset for Facial Motion Analysis in Individuals With Neurological Disorders', *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 25(4), 1111–1119.

Cao, R., Liu, X., Zhou, J., Chen, D., Peng, D. & Chen, T., 2021, *Outlier Detection for Spotting Micro-expressions*, *2021 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, 3006–3011, IEEE.

Ekman, P. & Friesen, W. V, 2003, *Unmasking the face: A guide to recognizing emotions from facial clues*, vol. 10, Ishk.

Fatchan, M., Hery Purnomo, M., Affandy, Zainul Fanani, A. & Marlinda, L., 2020, *Support Vector Machine and Neural Network Algorithm Approach to Classifying Facial Expression Recognition*, *2020 Fifth International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, 1–5, IEEE.

Guermazi, R., Abdallah, T. Ben & Hammami, M., 2021, 'Facial micro-expression recognition based on accordion spatio-temporal representation and random forests', *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 79, 103183.

Heugten Breurkes, J. van & Green, R., 2021, *Autonomous Detection of Facial Tics in Video Recordings*, *2021 36th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, 1–6, IEEE.

Jankovic, J. & Tolosa, E., 2007, *Parkinson's disease and movement disorders*, Lippincott Williams & Wilkins.

Kandel, E.R., Jessell, T.M., Schwartz, J.H., Siegelbaum, S.A. & Hudspeth, A.J., 2013, *Principles of Neural Science, Fifth Edition*, McGraw-Hill Education.

Kurlan, R., 2005, *Handbook of Tourette's syndrome and related tic and behavioral disorders Second Edition*, CRC Press.

Larrazabal, A.J., Cena, C.E.G. & Martinez, C.E., 2019, *Eye corners tracking for head movement estimation*, *2019 IEEE International Work Conference on Bioinspired Intelligence (IWOBI)*, 000053–000058, IEEE.

Leisman, G. & Sheldon, D., 2022, 'Tics and Emotions', *Brain Sciences*, 12(2), 242.

Martinez, B., Valstar, M.F., Jiang, B. & Pantic, M., 2019, 'Automatic Analysis of Facial Actions: A Survey', *IEEE Transactions on Affective Computing*, 10(3), 325–347.

Murtaza, M., Sharif, M., AbdullahYasmin, M. & Ahmad, T., 2019, *Facial expression detection using Six Facial Expressions Hexagon (SFEH) model*, *2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 0190–0195, IEEE.

Reyes Ortiz Jorge, Anguita Davide, Ghio Alessandro, Oneto Luca & Parra Xavier, 2012, *Human Activity Recognition Using Smartphones*.

Shahar, H. & Hel-Or, H., 2019, *Micro Expression Classification using Facial Color and Deep Learning Methods*, *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW)*, 1673–1680, IEEE.

Sophie Brügge, N., Mohammadi, E., Münchau, A., Bäumer, T., Frings, C., Beste, C., Roessner, V. & Handels, H., 2023, *Towards Privacy and Utility in Tourette TIC Detection Through Pretraining Based on Publicly Available Video Data of Healthy Subjects*, *ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 1–5, IEEE.

Tang, Y., Bejar, B., Essoe, J.K.-Y., McGuire, J.F. & Vidal, R., 2022, *Facial Tic Detection in Untrimmed Videos of Tourette Syndrome Patients*, *2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 3152–3159, IEEE.

Vilchis, C., Perez-Guerrero, C., Mendez-Ruiz, M. & Gonzalez-Mendoza, M., 2023, 'A survey on the pipeline evolution of facial capture and tracking for digital humans', *Multimedia Systems*, 29(4), 1917–1940.

Virameteekul, S. & Bhidayasiri, R., 2022, 'We Move or Are We Moved? Unpicking the Origins of Voluntary Movements to Better Understand Semivoluntary Movements', *Frontiers in Neurology*, 13.

Zhang, W., Qiu, F., Wang, S., Zeng, H., Zhang, Z., An, R., Ma, B. & Ding, Y., 2022, *Transformer-based Multimodal Information Fusion for Facial Expression Analysis*, *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2427–2436, IEEE.

ISSN: 2992-8338

Ankle stiffness estimation: state of the art review

Rodrigo A. García Cerda*, Andrés Blanco Ortega*, Jorge Colín Ocampo*, Arturo Abúndez Pliego*, José A. Santana Camilo**

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca Morelos México (Tel: 436-117-1385; e-mail: m23c3141cenidet.tecnm.mx).*

*** Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Morelos, México, C.P. 62780 (Tel: 734-343-2110; e-mail: jasantanac@hotmail.com)*

Abstract: This state-of-the-art review article addresses the ankle joint stiffness estimation methods reported in the literature. Where a variety of techniques and approaches used to estimate ankle stiffness are identified. Both traditional clinical methods, such as range of motion tests and scales, as well as instrumental tools and biomechanical measurement devices used, such as ankle rehabilitators, are examined. The advantages and limitations of each approach are discussed, highlighting specific applications for different clinical conditions, from acute injuries to chronic diseases. Additionally, emerging technologies and their potential to improve accuracy and objectivity in the assessment of ankle stiffness are explored.

Keywords: Stiffness estimation, ankle stiffness measurement, ankle rehabilitation, ankle movements.

1. INTRODUCCION

En el ámbito de la investigación en biomecánica y salud, se han logrado avances significativos en la caracterización o estimación de la rigidez del tobillo. Esta estimación es un factor crucial para comprender y abordar diversas condiciones clínicas y lesiones asociadas con la articulación.

La complejidad funcional de la articulación del tobillo, que permite una amplia gama de movimientos, ha generado la necesidad de desarrollar métodos precisos y avanzados para evaluar su rigidez tanto en condiciones estáticas como dinámicas, generalmente, utilizando dispositivos activos. Se señalan las contribuciones en investigación, tecnologías de medición y enfoques metodológicos, analizando cómo estos han facilitado una comprensión más profunda de la rigidez del tobillo en diferentes contextos, desde la prevención de lesiones deportivas hasta la rehabilitación postoperatoria.

1.1 Rigidez del tobillo

La rigidez del tobillo se refiere a la resistencia que ofrece la articulación del tobillo a los movimientos, especialmente en términos de flexión y extensión, esta puede ser influenciada por varios factores, como la fuerza y flexibilidad de los músculos que rodean la articulación, la salud de los ligamentos y la estructura ósea. Esta característica es esencial para la función normal del pie y la capacidad de adaptarse a diversas actividades, como caminar, correr o realizar actividades deportivas.

La medición cuantitativa de la rigidez de la articulación del tobillo, después de un accidente cerebrovascular, enfermedades como la osteoporosis, lesiones por edad o por actividad física, entre otras, tiene como escala evaluadora del grado de lesión y podría resultar útil para monitorear la mejora de la articulación en un programa de rehabilitación.

1.2 Movimientos del tobillo

El tobillo es una articulación crucial que permite movimientos importantes en el pie. Los movimientos principales del tobillo incluyen (ver Figura 1) [1]:

- Flexión Plantar:
  - ✓ Descripción: Movimiento hacia abajo del pie, apuntando los dedos hacia el suelo.
  - ✓ Importancia: Crucial para caminar, correr y empujar hacia adelante al levantar el talón.
- Flexión Dorsal:
  - ✓ Descripción: Movimiento hacia arriba del pie, apuntando los dedos hacia la espinilla.
  - ✓ Importancia: Esencial para levantar el pie del suelo y al caminar.
- Inversión:
  - ✓ Descripción: Movimiento del pie hacia adentro, llevando la planta del pie hacia el cuerpo.
  - ✓ Importancia: Contribuye a estabilizar el pie y el tobillo durante la marcha y actividades de lado a lado.
- Eversión:
  - ✓ Descripción: Movimiento del pie hacia afuera, alejando la planta del pie del cuerpo.
  - ✓ Importancia: También contribuye a la estabilidad y el equilibrio durante la marcha y otros movimientos.
- Abducción/aducción:

ISSN: 2992-8338

Descripción: movimiento externo e interno en el plano sagital.



Figura 1.Movimientos en el tobillo [1].

Estos movimientos son esenciales para realizar las actividades cotidianas como: deportes y mantener la estabilidad al caminar o estar de pie. La falta de movilidad en el tobillo o la debilidad en los músculos que lo rodean pueden contribuir a lesiones y afectar la funcionalidad general del pie y la pierna.

1.3 Grados de movilidad del tobillo

Los grados máximos de movimiento del tobillo pueden variar ligeramente entre individuos debido a diferencias anatómicas y niveles de flexibilidad. Sin embargo, en términos generales, se consideran los siguientes rangos de movimiento normal (Tabla 1):

Tabla 1 Grados de movimiento del tobillo [2].

Tipo de movimiento	Rango de movimiento máx.
Dorsiflexión	20.3° a 29.8°
Plantarflexión	37.6° a 45.8°
Abducción	15.4° a 25.9°
Aducción	22° a 36°
Inversión	20° a 30°
Eversión	5° a 10°

2. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ DEL TOBILLO

La estabilidad funcional de la articulación del tobillo ha despertado mucho interés entre los investigadores, ya que desempeña un papel importante para la estabilidad de las personas. Esta estabilidad está influenciada por mecanismos pasivos como la rigidez de los ligamentos, así como por mecanismos activos y neuromotores como el control de reflejo y voluntario.

Para determinar la rigidez del tobillo, se analizan principalmente dos tendones importantes:

- Tendón de Aquiles: este tendón conecta los músculos de la pantorrilla con el talón y es fundamental para la flexión plantar del pie, lo que afecta la rigidez del tobillo durante el movimiento.
- Tendón del tibial posterior: este tendón se encuentra en la parte interna del tobillo y es esencial para mantener el arco del pie y estabilizar el tobillo durante la marcha.

Estos tendones se consideran críticos en el análisis de la rigidez del tobillo debido a su papel en la biomecánica y la función del pie y el tobillo [3].

La rigidez de las articulaciones se puede clasificar dependiendo de si se mide en condiciones pasivas o activas. La rigidez pasiva se describe como la resistencia al acortamiento o al alargamiento; en el contexto de la biomecánica se refiere a la rigidez mecánica que proporciona la combinación de la articulación, el tendón y el tejido conectivo. La rigidez activa es una función de la activación muscular y la contracción del músculo a través del reflejo de estiramiento [4].

Actualmente se utiliza una técnica de evaluación, donde el especialista de la salud a través de "La Escala Modificada de Ashworth" evalúa la espasticidad (aumento de la rigidez en los músculos) en una lesión donde se ven limitados los movimientos de la articulación, dicha evaluación está dada bajo un puntaje basado en la Tabla 2 [5].

Tabla 2 Escala Modificada de Ashworth [5].

Escala de Ashworth Modificada		Valores
0	No hay cambios en la respuesta del músculo en los movimientos de flexión o extensión.	0
1	Ligero aumento en la respuesta del músculo al movimiento (flexión o extensión) visible con la palpación o relajación, o solo mínima resistencia al final del arco del movimiento.	1
1+	Ligero aumento en la resistencia del músculo al movimiento en flexión o extensión seguido de una mínima resistencia en todo el resto del arco de movimiento (menos de la mitad).	2
2	Notable incremento en la resistencia del músculo durante la mayor parte del arco de movimiento articular, pero la articulación se mueve fácilmente.	3
3	Marcado incremento en la resistencia del músculo; el movimiento pasivo es difícil en la flexión o extensión.	4
4	Las partes afectadas están rígidas en flexión o extensión cuando se mueven pasivamente	5

La Escala Modificada de Ashworth se destaca como un instrumento, útil y válido, pero inexacto ya que responde al movimiento pasivo realizado por el evaluador en una articulación específica. Esta herramienta tiene una relevancia más amplia en la medición clínica del compromiso de la espasticidad, se considera una de las maneras más ambiguas para evaluar una lesión, misma que sirve de referencia dado que está directamente involucrada con la rigidez de la articulación.

Históricamente, la medición manual de la rigidez de la articulación espástica del tobillo ha sido realizada utilizando dinamómetros portátiles o dispositivos alternativos, pero se han encontrado algunas dificultades en el control de la velocidad aplicada al tobillo durante la medición.

En [6] evaluaron la respuesta mecánica de 14 sujetos normales, entre 20-37 años, al estiramiento en dorsiflexores de tobillo, en condiciones normales y en diferentes niveles de contracción voluntaria. La rigidez incremental total la definen como la relación entre el incremento del par y la amplitud del estiramiento. En los 14 sujetos de prueba, la rigidez total

ISSN: 2992-8338

aumentó de -0.6 Nm/grado a -2.5 Nm/grado al 50% de la contracción voluntaria máxima y permaneció constante del 30 al 80% de la contracción voluntaria máxima. La fuerza del tobillo plantar y dorsiflexores se midió como el torque ejercido sobre la plataforma. El par fue monitoreado por galgas extensiométricas, montadas en un sistema de palancas que servían de engranaje entre la plataforma y un motor, ver Figura 2.

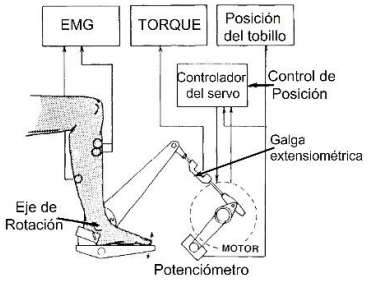


Figura 2. Dispositivo controlado con retroalimentación de posición y velocidad para tobillo.

En [7, 8] realizaron pruebas con pacientes sanos, utilizando un mecanismo que va colocado en la articulación del tobillo mientras realiza a marcha en una máquina caminadora automática. Midieron el par y la posición para determinar la rigidez de la articulación del tobillo, ver Figura 3.
Los datos registrados de posición y torque se utilizaron como entrada y salida respectivamente para caracterizar el sistema dinámico de forma no paramétrica, con su impulso función de respuesta (IRF).

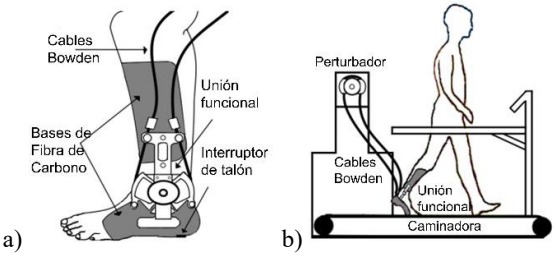


Figura 3. a) Articulación funcional montada en el tobillo, b) configuración de pruebas dinámicas [7].

Los autores relacionaron la impedancia con la posición y el torque que actúa sobre esa articulación. Fue descrita como un sistema de segundo orden (1), que consiste en un sistema inercial, componente viscoso y elástico. La impedancia articular permite comprender cómo se produce un cambio en la posición de la articulación, se traduce en fuerzas generadas alrededor del eje de rotación de esa articulación.
La inercia de la extremidad (I), la viscosidad (B) y la rigidez de la articulación (K) se pueden identificar a partir de la medición del ángulo de articulación y el momento de torsión que actúa sobre la articulación.

$$Tq = I\frac{d^2\theta}{dt} + B\frac{d\theta}{dt} + K(t)\theta \qquad (1)$$

Donde:

- Tq: representa el par de salida
- θ: es la posición de entrada de la articulación
- I: es la inercia de la articulación
- B: es la viscosidad
- K: es la rigidez de la articulación. La ecuación 2.1 es una representación típica [7].

Para caracterizar la rigidez a través de un sistema dinámico, de forma no paramétrica, con la función respuesta al impulso o por sus siglas en inglés (IRF), la rigidez intrínseca de las articulaciones se estimó mediante IRF dinámicas donde puede considerarse como una suma de convolución de su entrada y el IRF, como se expresa en (2).

$$y(t) = \sum_{k=0}^{M} h(k)u(t-k) \qquad (2)$$

Donde:

- $y(t)$ es la salida
- $u(t)$ es la entrada
- $h(k)$ es el IRF del sistema
- M es el número de muestras en la memoria del sistema.

Esto representa un sistema causal, donde la IRF es una función unilateral, que depende únicamente de las entradas del sistema actual y datos almacenados. El resumen de la modulación de la rigidez del tobillo que obtuvieron durante el experimento dinámico en tres fases del ciclo de la marcha e isométricamente en la fase correspondiente se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Resultados isométricos obtenidos [7].

Dirección de perturbación	Fase inicial	Mantener liberado
20% Plantarflexión	575.2 [Nm/rad]	-17.7 [Nm/rad]
20% Dorsiflexión	12.6 [Nm/rad]	-142.3 [Nm/rad]
50% Plantarflexion	333.7 [Nm/rad]	330.3 [Nm/rad]
50% Dorsiflexión	-126.3 [Nm/rad]	478.4 [Nm/rad]
90% Plantarflexión	347.1 [Nm/rad]	-212.5 [Nm/rad]
90% Dorsiflexión	582.4 [Nm/rad]	-105.5 [Nm/rad]

También en [9] midieron la rigidez mecánica intrínseca del tobillo utilizando un método que permite medir la actividad en reposo y que utiliza perturbaciones que son comparables a los movimientos del tobillo que normalmente se experimentan al estar de pie en estado estático. La esencia de la técnica es que mide la rigidez intrínseca, que es la rigidez antes de que el sistema nervioso tenga tiempo de producir cualquier cambio por reflejo u otros medios.
En [10] diseñaron un método para medir de rigidez de inversión/eversión del tobillo en un dispositivo de soporte oscilante medial/lateral, ver Figura 4. Los datos de oscilación transitoria que representan la rigidez de inversión/eversión se obtuvieron en una postura bípeda y erguida. Implementan análisis de regresión para determinar la rigidez del tobillo de 20 sujetos físicamente activos. De las pruebas, determinan que los valores medios de rigidez activa del tobillo fueron de 35.70 Nm/rad (Desviación Estándar 9.45).

ISSN: 2992-8338

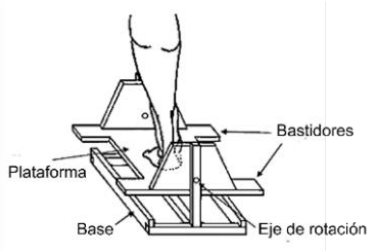


Figura 4. Dispositivo de cuna oscilante de inversión/eversión [10].

En [11] evaluaron la rigidez dinámica de las articulaciones representando funciones IRF con dos caras, que tienen valores distintos de cero en valores negativos. Esto sugiere un sistema a-causal, que incluye un sistema anticipatorio en el elemento modelo. Reescribe (3) en una convolución discreta de dos caras y obtiene la ecuación 3:

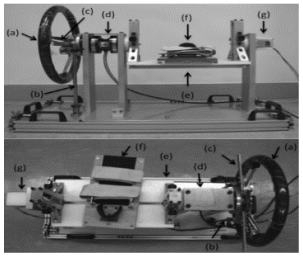
$$y(i) = \Delta t \sum_{j=M_1}^{M_2} h(i,j)u(i-j) \qquad (3)$$

Donde:

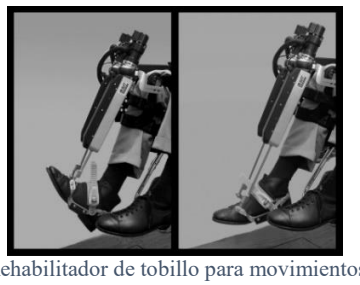
- *y(i)* es la salida en la muestra i
- *u(i)* es la entrada en la muestra i
- *h(j)* es el IRF
- *j* es el retraso del IRF
- M_1 y M_2 son los rezagos máximo y mínimo.

En [12] diseñaron un nuevo dispositivo automatizado de medición de la rigidez que pudiera realizar una medición simultánea de los ángulos de flexión dorsal y plantar y el torque resistivo correspondiente alrededor del centro de rotación de una órtesis articulada de tobillo y pie (AAFO). Esto se logró controlando las velocidades angulares y el rango de movimiento en el plano sagital. El dispositivo consistía de una máquina de prueba de fatiga servo hidráulica, un medidor de torsión, un potenciómetro, una placa giratoria y un soporte vertical para permitir conectar un AAFO al dispositivo mediante un vástago sustituto.

En [13] presentaron un dispositivo manual que permite la caracterización de la rigidez de tobillo; en movimientos dorsiflexión y plantarflexión, para determinar las características mecánicas apropiadas requeridas en una prescripción eficaz de una órtesis de tobillo-pie. El dispositivo manual cuenta con un torquímetro, un potenciómetro, un volante, un plato giratorio y un reposapiés, ver Figura 5. En este estudio participaron diez sujetos masculinos con hemiplejía que sufrieron un accidente cerebrovascular durante más de tres años. El dispositivo facilitó la medición de las posiciones angulares y sus pares correspondientes, simultáneamente, alrededor de una articulación del tobillo en el plano sagital aplicando una fuerza manual al volante vinculado a la placa giratoria. La calibración del torquímetro se realizó aplicando una serie creciente de momentos conocidos (0 a ±30 Nm cada 2 Nm) en la posición 0° usando una viga y un peso, mientras que la del potenciómetro se realizó con una serie creciente de ángulos conocidos (0 a ±55° a cada 5°) utilizando un transportador.


Figura 5. Un dispositivo manual de evaluación de la articulación del tobillo: (a) dirección de rueda; (b) tapón mecánico; c) barra; (d) torquímetro; (e) placa giratoria; (f) plataforma para los pies; (g) potenciómetro [13].

En [14] evaluaron la rigidez mecánica pasiva en el tobillo utilizando un robot de rehabilitación, ver Figura 6. Caracterizaron la rigidez del tobillo, tanto en el plano sagital como en el frontal, aplicando perturbaciones a la articulación del tobillo, en un estado relajado, en todo el rango de movimiento.


Figura 6. Rehabilitador de tobillo para movimientos sagitales y frontales [6].

En [15] se utilizó el AnkleBot del IMT, Figura 7, que es un robot para la rehabilitación de tobillo. Este mecanismo tiene dos actuadores lineales conectados entre la pierna y el pie del paciente. Cuando los actuadores trabajan en la misma dirección se tienen movimientos de dorsiflexión y plantarflexión, y cuando trabajan en direcciones opuestas realizan movimientos de abducción y aducción. El rehabilitador de tobillo proporciona información, sobre la cinemática y los torques del tobillo, basada en la geometría del dispositivo, salidas de sensores, datos antropométricos y un modelo matemático. Los autores [15, 16, 17, 18, 19] argumentan que Anklebot se trata del desarrollo de una herramienta eficaz, capaz de ser utilizada en mediciones clínicas [18].


Figura 7 Rehabilitador de tobillo del MIT (Anklebot) [15].

Misgeld *et al*. [20] realizaron la estimación de la rigidez de la articulación del tobillo en el plano sagital en dorsiflexión y flexión plantar. Para esta estimación, formularon un nuevo modelo biomecánico no lineal de la parte inferior de la pierna

ISSN: 2992-8338

impulsado por señales electromiográficas. El modelo incorpora una descripción cinemática bidimensional en el plano sagital para el cálculo de la palanca muscular. Para reducir los errores de estimación debidos a las incertidumbres del modelo, desarrollaron un algoritmo de filtrado del tipo Kalman, debido a las no linealidades inherentes y la dinámica no suave.

Una herramienta para evaluar la rigidez, es el Myotonometer, que mide el desplazamiento del tejido por unidad de fuerza aplicada a través de una sonda manual [21], algunos estudios han empleado robots controlados por par, específicamente rehabilitadores de tobillo, para determinar la rigidez en movimientos pasivos [22, 23].

Por otro lado, en [24] analizaron mediciones de la rigidez biaxial del tobillo en adultos mayores, donde la articulación del tobillo se mueve pasivamente. Mediante un entrenador de movimiento de tobillo biaxial automático personalizado (AMT) determinan la rigidez del tobillo y se explica su cálculo a lo largo del talocrural y subastragalina, utilizando pares medidos por fuerzas de reacción verticales, desde la placa del pie en ángulos de rotación del tobillo dados. La rigidez del tobillo (K_{ankle}) se definió como la pendiente de los pares y ángulos del tobillo, con respecto a la posición neutra del tobillo (4):

$$K_{ankle} = \frac{\Delta T}{\Delta \theta} = \frac{T_\theta - T_0}{\theta - \theta_0} \quad (4)$$
$$= \frac{(F_{\theta,Fore} - F_{\theta,Hind})l_0 - (F_{\theta 0,Fore} - F_{\theta 0,Hind})l_0}{\theta - \theta_0}$$

Donde l_0 es un brazo de momento, F_θ es la fuerza de reacción vertical, Fore se refiere al antepié, Hind se refiere al retropié, θ es un ángulo de tobillo dado, y θ_0 es un ángulo neutro del tobillo. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 8.

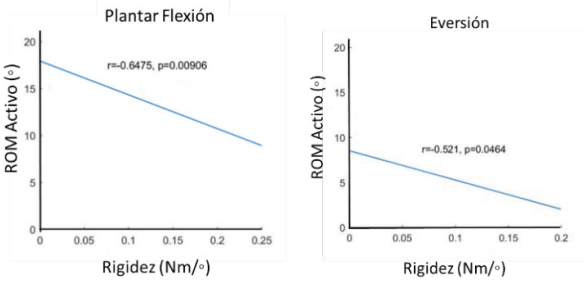


Figura 8. Relación entre el rango de movimiento activo (ROM) y la rigidez en flexión plantar del tobillo.

En [25] diseñaron y evaluaron un dispositivo de medición de rigidez a través de una órtesis de tobillo-pie, utilizaron la curva par-ángulo. Calcularon la rigidez rotacional y la histéresis para velocidades de hasta 37 grados/s. El dispositivo de medición de rigidez se compone de una pierna sustituta (órtesis) impulsada por un actuador lineal que gira alrededor de la articulación del tobillo, ver Figura 9. Obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 10.

En [26] propusieron una nueva técnica para medir la orientación y la rigidez del tobillo mediante el uso de potenciómetros angulares y celdas de carga de seis ejes. El dispositivo utilizado se muestra en la Figura 11. El ángulo se mide con un potenciómetro, considerando la posición neutra (NP) como 0°.

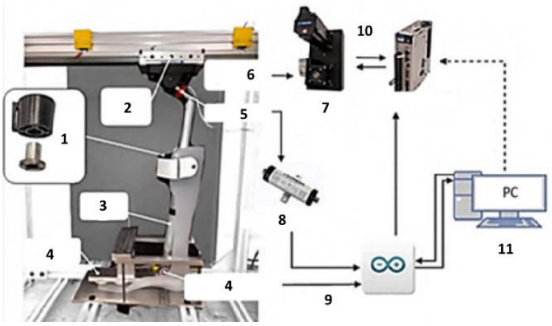


Figura 9 Componentes de la órtesis para la medición de rigidez: 1. Rodamiento, 2. Carro actuador, 3. Vástago, 4. Abrazadera, 5. Celda de carga, 6. Correa de transmisión, 7. Trasmisión, 8. Señal condicionada, 9. Angulo de tobillo, 10. Motor, 11. Llegada de señal de microcontrolador e interpretación [25] .

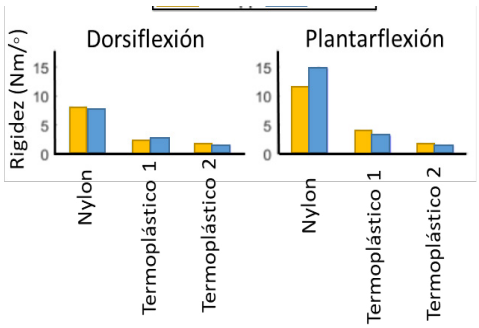


Figura 10 La rigidez media en carga para tres AFO (Órtesis tobillo-pie) medidas con los dispositivos SMApp y BRUCE. Cada (◦) representa datos de un ciclo individual.

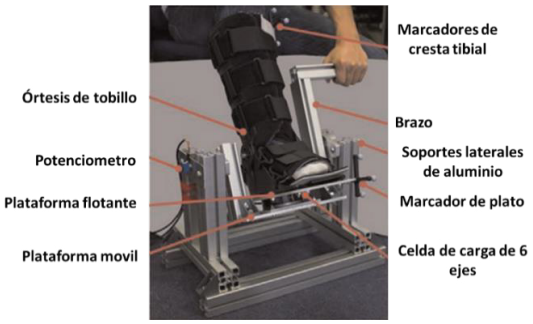


Figura 11. Dispositivo de evaluación el tobillo [26].

3. CONCLUSIONES

De la revisión del estado del arte, se puede identificar que la rigidez del tobillo puede variar dependiendo de las condiciones, como: tobillo sin lesión, tobillo con lesión, persona pasiva, persona activa como los deportistas, principalmente. Para la caracterización de la rigidez del tobillo se han utilizado principalmente dispositivos que relacionan un par con el ángulo de movimiento del tobillo.

De la literatura reportada, el valor promedio de la rigidez del tobillo para personas con lesión es de 38.2 Nm/Rad y sin lesión es de 45.6 Nm/rad. Es importante destacar que, durante la fase aguda de la lesión, es común observar un aumento en la rigidez debido a la inflamación y la respuesta protectora del cuerpo.

ISSN: 2992-8338

Este fenómeno subraya la importancia de considerar el momento de la evaluación al interpretar los datos de rigidez del tobillo. Por lo que es importante desarrollar técnicas, instrumentaciones y dispositivos que permitan estimar la rigidez del tobillo. Herramienta para un fisioterapeuta para poder estandarizar el grado de afectación de una lesión.

4. BIBLIOGRAFIA

[1] E. M. García, "Análisis Cinemático y Diseño de una Órtesis de Tobillo," 2010.

[2] M. García, "Análisis cinemático y diseño de una prótesis de tobillo" *Scielo,* 2015.

[3] A. Villa-Forte, "Evaluación del tobillo," *Manual MSD,* 2022.

[4] C. Capaday, "The special nature of human walking and its neural control" Trends *in neurosciences*, 2002, pp. 370-3763.

[5] S.I. Pascual, A. Herrera Galante, "Guía terapéutica de la espasticidad infantil con toxina botulínica" *Revista Neuronal,* 2007.

[6] Thomas Sinkher, Egon Toft, Steen Andreassen, And Birte C. Hornemann, "Muscle Stiffness in Human Ankle Dorsiflexors: Intrinsic and Reflex Components" *Journal of Neurophysiology,* 1988.

[7] Maciel Plocharski, Piotr Plocharski, group 13gr1076, "Ankle joint stiffness during phases of human walking" 2013.

[8] R. E. Kearney, "System identification of human joint dynamics" *Critical review in biomedical engineering,* p. 55, 1997.

[9] Lakie, Ian D. Loram and Martin, "Direct measurement of human ankle stiffness during quiet standing: the intrinsic mechanical stiffness is insufficient for stability" Journal of Physiology, Birmingham, UK, 2002.

[10] Steven M. Zindera, Kevin P. Granata, Darin A. Paduac, Bruce M. Gansneder, "Validity and reliability of a new in vivo ankle stiffness measurement device" *Elsevier,* p. 463–467, 2005.

[11] Perreault, D. T. Westwick & E. J. "Identification of apparently acausal stiffness models. In Engineering in Medicine and Biology Society" de *IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference of the*, 2006.

[12] Toshiki Kobayashi, Aaron K.L. Leung, Yasushi Akazawa, Masao Tanaka, Stephen W. Hutchins, "Quantitative measurement of spastic ankle joint stiffness using a manual device: A preliminary study *"Elsevier,* 2010.

[13] Toshiki Kobayashi, Aaron KL Leung, and Stephen W Hutchins, "Design of a manual device to measure ankle joint stiffness and range of motion" *Prosthetics and Orthopedics International,* 2011.

[14] Roy A. Hermano I Krebs, Christopher T. Bever, Larry W Forrester, Richard F. Macko, Neville Hogan, "Measurement of passive ankle stiffness in subjects with chronic hemiparesis using a novel ankle robot. J Neurophysiol" *Epub,* May 2011.

[15] Pasqual, Thales B., "Serious Game Development for Ankle Rehabilitation Aiming at User Experience" de *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob*, UTown, Singapore, 2016.

[16] Anindo Roy, Member, Hermano I, Senior Member, Shawnna L. Timothy N. Judkins, Ira Khanna, Larry W. "Measurement of Human Ankle Stiffness Using the Anklebot" *IEEE,* 2015.

[17] Krebs, K. Swaminathan y HI, "Análisis del entrenamiento del tobillo como método para reducir el deterioro parético de las extremidades inferiores, un estudio de caso en electromiografía" de *Conferencia internacional IEEE*, Singapur, 2015.

[18] Anindo Roy, Hermano I. Krebs, Christopher T. Bever, Larry W. Forrester, Richard F. Macko, and Neville Hogan, "Measurement of passive ankle stiffness in subjects with chronic hemiparesis using a novel ankle robot"2011.

[19] "Measurement of Human Ankle Stiffness Using the Anklebot" de *10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, Netherlands, 2007.

[20] Berno J. E. Misgeld, Tony Zhang, Markus J. Lüken and Steffen Leonhardt, "Model-Based Estimation of Ankle Joint Stiffness" *MDPI,* 2017.

[21] Charles T. Leonard PT, PhD, William P Deshner PT, James W. Romo PT, Eric S Suoja PT, Steven C. Fehrer PT, Eugene L. Mikhailenok, "Myotonometer Intra- and Interrater Reliabilities" *Elsevier,* 2003.

[22] Kenta Nomura, Teru Yonezawa, Hiroshi Mizoguchi, Hiroshi Takemura, "Measurement of the passive stiffness of ankle joint in 3 DOF using Stewart platform type ankle foot device" *NIH,* 2016.

[23] T. S. E Toft, "H-reflex changes during contractions of the ankle extensors in spastic patients" *PubMed,* 1993.

[24] Hogene Kim, Sangwoo Cho and Hwiyoung Lee, "Reliability of Bi-Axial Ankle Stiffness Measurement in Older Adults" *MDPI,* 2021.

[25] Deema Totah, Meghna Menon, Deanna H. Gates, Kira Barton., "Design and evaluation of the SMApp: A stiffness measurement apparatus for ankle–foot orthoses" *Elsevier,* 2021.

[26] Zhang, Mingming; Davies, T. Claire; Nandakumar, Anoop; Xie, Sheng Quan, "A novel assessment technique for measuring ankle orientation" *Elsevier,* p. 3, 2015.

ISSN: 2992-8338

Evaluación Comparativa de Máquina de Soporte Vectorial y K-Vecinos para Optimizar la Detección Facial de Emociones

C.I. Barcenas-Rosales[1], A. González-Lorence[2*], C. Morales-Morales1, Ma. S. Guerrero-Ramírez[1], A. Valdés-Vega[1], A. Arredondo-Brun[1]

1Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Juan del Río, Ave. Tecnológico No.2, CP. 76800. San Juan del Río, Querétaro, México.

**Autor por correspondencia (e-mail: armida.gl@sjuanrio.tecnm.mx}*

Resumen: Se presenta la viabilidad de emplear hardware de recursos limitados junto con software actual para medir el rendimiento de dos algoritmos de inteligencia artificial: K-Vecinos y Máquinas de Soporte Vectorial, en el análisis de reconocimiento facial y detección de emociones. El objetivo es determinar cuál de los dos algoritmos mencionados es el más apropiado para desarrollar aplicaciones que identifiquen correctamente las emociones.

Palabras Clave: Machine Learning, Emociones, Inteligencia Artificial, Máquina Vectorial, K-Means

1. INTRODUCCION

Esta investigación se centra en la problemática de la obsolescencia tecnológica y la gestión de residuos electrónicos, explorando cómo los algoritmos de inteligencia artificial pueden aprovechar hardware con al menos cinco años de antigüedad. El estudio se enfoca en evaluar la viabilidad de combinar este hardware con software actualizado en equipos de cómputo. El objetivo principal es establecer criterios de evaluación para algoritmos de IA (Inteligencia Artificial) como K-Vecinos y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM, por sus siglas en inglés), con el fin de capturar y analizar emociones, y medir su rendimiento. Esta investigación busca proporcionar una comprensión profunda de cómo la tecnología existente puede ser efectivamente reutilizada para abordar el desafío de identificar emociones aún en el contexto de tecnología obsoleta.

En la última década, el campo del reconocimiento de emociones ha experimentado un crecimiento exponencial gracias al desarrollo de tecnologías de visión por computadora y algoritmos de aprendizaje automático. Estos avances han posibilitado la creación de sistemas cada vez más sofisticados capaces de identificar y clasificar emociones en imágenes y videos con una precisión notable.

Una revisión crítica de la literatura revela una serie de avances significativos en este campo. Por ejemplo, Canteras Cañizares (2017) introdujo un detector de emociones que utiliza el algoritmo Local Patrones Binarios (LBP, por sus siglas en inglés) en combinación con un algoritmo de aprendizaje supervisado basado en máquinas de vectores de soporte (SVM). Aunque este enfoque logra una clasificación precisa de las emociones, su limitación para analizar solo un rostro por imagen puede restringir su aplicabilidad en escenarios con múltiples personas.

Anrango Calvaci (2019) y Pinzón Naranjo (2020) presentaron sistemas de reconocimiento de emociones faciales que aprovechan la versatilidad de Python y la biblioteca OpenCV.

A pesar de sus promesas en la capacidad de análisis emocional, estos sistemas enfrentan desafíos en términos de escalabilidad y adaptabilidad a diferentes entornos de aplicación.

Por otro lado, Parisela Canasas (2021) y Avilés Valencia (2021) exploraron el potencial de las redes neuronales convolucionales para el reconocimiento de emociones en tiempo real a través de dispositivos móviles. Aunque estos enfoques demuestran una eficiencia notable, es crucial abordar preocupaciones sobre la privacidad y la ética en la recopilación y análisis de datos emocionales en entornos públicos.

El estudio más reciente de Cazorla y Gómez-Donoso (2024) propone un enfoque de vanguardia utilizando técnicas de aprendizaje profundo y redes neuronales convolucionales para el reconocimiento de emociones. Aunque este enfoque muestra un gran potencial en términos de precisión y robustez, se necesitan más investigaciones para abordar cuestiones pendientes relacionadas con la interpretación de resultados y la generalización a diferentes contextos.

En conclusión, este trabajo aborda la problemática de la obsolescencia tecnológica y la gestión de residuos electrónicos mediante el aprovechamiento de algoritmos de inteligencia artificial en hardware con al menos cinco años de antigüedad. La propuesta se centra en evaluar la viabilidad de combinar este hardware con software actualizado para identificar y clasificar emociones utilizando los algoritmos SVM y K-Vecinos. Los resultados de este estudio proporcionarán una base sólida para el desarrollo de aplicaciones de reconocimiento de emociones en contextos con recursos tecnológicos limitados.

ISSN: 2992-8338

2. MATERIALES

En esta sección, se describen los materiales utilizados para el desarrollo del sistema de reconocimiento de emociones. Se detallan los requisitos de hardware, incluyendo las especificaciones mínimas de las cámaras y los equipos de cómputo necesarios para un procesamiento adecuado de las imágenes. Además, se presenta una descripción del software empleado, haciendo énfasis en las bibliotecas de código abierto OpenCV y DLib, así como en las herramientas complementarias Scikit-Learn y Joblib. Se justifica la elección de Python como lenguaje de programación principal debido a su versatilidad y amplio soporte en el campo del análisis de datos y la inteligencia artificial.

2.1 Hardware

La estrategia para abordar el problema se fundamenta en el uso de cámaras con resoluciones básicas, donde se considera que una resolución básica cumple con las dimensiones típicas de 640 x 720 píxeles. Estas cámaras son habituales en dispositivos electrónicos como las cámaras integradas en computadoras portátiles. Sin embargo, para garantizar un procesamiento de imágenes adecuado, se requieren equipos con ciertas especificaciones mínimas, tales como un procesador Intel de la serie Celeron o un AMD E9, y al menos 8 GB de memoria RAM.

2.2 Software

El sistema de reconocimiento de emociones se desarrolló utilizando Python como lenguaje de programación principal, aprovechando su amplia gama de bibliotecas y herramientas especializadas en procesamiento de imágenes y aprendizaje automático. La solución propuesta se basa en la combinación de técnicas de detección facial, extracción de características y clasificación de emociones mediante algoritmos de inteligencia artificial.

Para la detección facial, se empleó la biblioteca DLib, que destaca por su modelo pre-entrenado de detección de puntos faciales. Este modelo permite localizar y extraer las regiones de interés del rostro, como los ojos, la nariz, la boca y las cejas, proporcionando una base sólida para el análisis posterior de las emociones.

Una vez detectado el rostro y sus puntos clave, se utilizó la biblioteca OpenCV para realizar operaciones de procesamiento de imágenes, como la normalización y el preprocesamiento de los datos. Estas operaciones son fundamentales para garantizar la calidad y consistencia de las imágenes antes de su análisis por parte de los algoritmos de clasificación.

Para la clasificación de emociones, se emplearon dos algoritmos de aprendizaje automático: Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y K-Vecinos. Estos algoritmos fueron entrenados utilizando un conjunto de datos etiquetado, que contenía imágenes de rostros asociadas a diferentes emociones. Durante el entrenamiento, se utilizaron técnicas de validación cruzada y ajuste de hiperparámetros para optimizar el rendimiento de los modelos.

La implementación de los algoritmos de clasificación se llevó a cabo utilizando la biblioteca Scikit-Learn, que proporciona una interfaz intuitiva y eficiente para el entrenamiento y evaluación de modelos de aprendizaje automático. Además, se empleó la biblioteca Joblib para la persistencia de los modelos entrenados, lo que permite su almacenamiento y carga de manera eficiente durante el proceso de desarrollo y despliegue del sistema.

3. FUNCIONAMIENTO

3.1 Clasificador en Cascada (Cascade Classifier)

Para garantizar la precisión del sistema de análisis de emociones, el proceso inicial consiste en la adquisición de imágenes faciales, como se muestra en la figura 1. Es esencial definir la emoción específica que se va a utilizar para el entrenamiento del modelo y proceder a la captura y almacenamiento de las imágenes en formato de video. El objetivo es generar un conjunto de datos compuesto por 200 imágenes etiquetadas con la emoción seleccionada. Este procedimiento se repite de manera sistemática para cada una de las emociones objeto de estudio: ira, felicidad, sorpresa y tristeza. El proceso de captura de imágenes se itera hasta completar el ciclo para todas las emociones predefinidas. Este enfoque metodológico y exhaustivo asegura la recopilación de un conjunto de datos completo y preciso, fundamental para el entrenamiento y evaluación del sistema de reconocimiento de emociones basado en técnicas de aprendizaje automático. La calidad y diversidad de las imágenes capturadas son factores críticos para el desarrollo de un modelo robusto y generalizable, capaz de identificar y clasificar de manera efectiva las emociones en tiempo real a partir de nuevas imágenes faciales.

```python
while True:

    ret, frame = cap.read()
    if ret == False:
        break
    frame = cv2.flip(frame,1)
    frame =  imutils.resize(frame, width=640)
    gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    auxFrame = frame.copy()

    faces = faceClassif.detectMultiScale(gray,1.3,5)

    for (x,y,w,h) in faces:
        cv2.rectangle(frame, (x,y),(x+w,y+h),(0,255,0),2)
        rostro = auxFrame[y:y+h,x:x+w]
        rostro = cv2.resize(rostro,(150,150),interpolation=cv2.INTER_CUBIC)
        cv2.imwrite(emotionsPath + '/rotro_{}.jpg'.format(count),rostro)
        count = count + 1
    cv2.imshow('frame',frame)
```

Figura 1. Captura y recorte de imágenes de rostros.

3.2 Entrenamiento del algoritmo

Con las imágenes faciales recopiladas, se procede a la fase de entrenamiento de los algoritmos de inteligencia artificial, como se ilustra en la figura 2. Para el algoritmo de K-Vecinos, se emplea la técnica de reconocimiento facial EigenFaces, que se fundamenta en el análisis de componentes principales (PCA) de la imagen. Este enfoque consiste en representar cada imagen facial como una combinación lineal de vectores característicos, denominados eigenfaces, que capturan las

ISSN: 2992-8338

variaciones más significativas entre las imágenes del conjunto de entrenamiento. Por otro lado, para el algoritmo de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), se utiliza la técnica FisherFaces, basada en el análisis discriminante lineal (LDA). A diferencia de EigenFaces, FisherFaces busca encontrar una transformación que maximice la separabilidad entre las clases emocionales en el espacio de características, proyectando los datos en direcciones que maximicen la razón entre la varianza interclase y la varianza intraclase. La selección de estas técnicas de reconocimiento facial se basa en su compatibilidad y eficacia comprobada con los algoritmos de aprendizaje automático correspondientes. La integración de EigenFaces con K-Vecinos y FisherFaces con SVM permite aprovechar las fortalezas específicas de cada enfoque, optimizando así el rendimiento y la precisión de los modelos en la tarea de reconocimiento de emociones. Este proceso de integración es crucial para el desarrollo de un sistema robusto y confiable, capaz de extraer características discriminativas de las imágenes faciales y clasificarlas correctamente en las categorías emocionales predefinidas.

```python
# Función para obtener el modelo correspondiente
def obtenerModelo(method, facesData, labels, tiempo_entrenamiento):
    # Se condiciona si se selecciona el método
    if method == 'KVecinos':
        emotion_recognizer = cv2.face.EigenFaceRecognizer_create()
    if method == 'SVM':
        emotion_recognizer = cv2.face.FisherFaceRecognizer_create()

    # Entrenando el reconocedor de rostros
    print("Entrenando ( "+method+" )...")
    inicio = time.time()
    emotion_recognizer.train(facesData, np.array(labels))
    tiempoEntrenamiento = time.time() - inicio
    tiempo_entrenamiento.append(tiempoEntrenamiento)  # Agregar tiempo de e
    print("Tiempo de entrenamiento ( "+method+" ): ", tiempoEntrenamiento)

    # Almacenando el modelo obtenido
    emotion_recognizer.write("modelo"+method+".xml")
```

Figura 2. Función usada para el reconocimiento y ejecución de los modelos SVM y K-Vecinos.

3.3 Activación de modelos

En la fase de evaluación, los modelos entrenados de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y K-Vecinos son aplicados para generar una representación visual en tiempo real del análisis de las imágenes de prueba. El proceso de reconocimiento de emociones se realiza mediante la detección del rostro en la imagen y la visualización de un emoji correspondiente a la emoción identificada por el modelo. Esta representación gráfica permite evaluar de manera intuitiva el rendimiento y la capacidad de generalización de los algoritmos implementados en la tarea de clasificación emocional. Los resultados visuales obtenidos, ilustrados en las figuras 3, 4, 5, y 6, proporcionan una indicación clara y efectiva de la habilidad de los modelos para reconocer y categorizar correctamente las emociones presentes en las imágenes de prueba. Estas visualizaciones facilitan la interpretación de los resultados y permiten una evaluación rápida de la precisión y eficacia de los algoritmos de inteligencia artificial aplicados a la identificación de expresiones faciales emocionales. La generación de estas representaciones visuales es un componente clave en la validación del sistema, ya que proporciona una retroalimentación inmediata sobre el desempeño de los modelos y su capacidad para generalizar a nuevas imágenes no utilizadas durante el entrenamiento. Además, esta visualización interactiva puede ser utilizada como una herramienta de demostración para comunicar de manera efectiva los resultados del sistema de reconocimiento de emociones a usuarios no técnicos y partes interesadas.



Figura 3. Resultados de captura de imágenes evaluando emoción de felicidad.

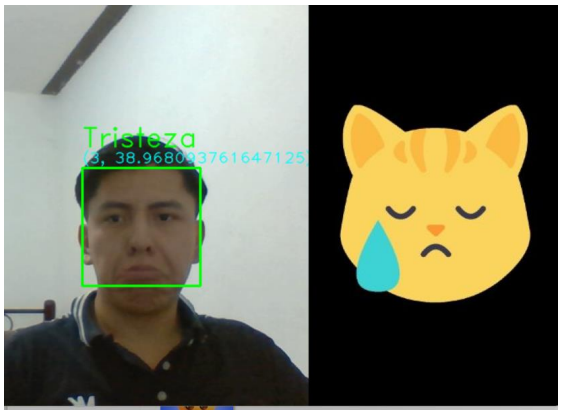


Figura 4. Resultados de captura de imágenes evaluando emoción de tristeza.

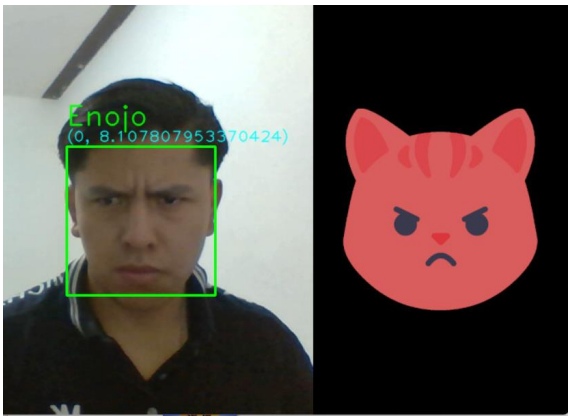


Figura 5. Resultados de captura de imágenes evaluando emoción de enojo.

ISSN: 2992-8338

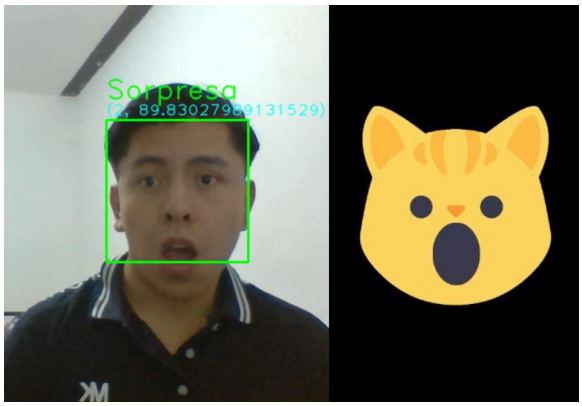


Figura 6. Resultados de captura de imágenes evaluando emoción de sorpresa.

4. RESULTADOS

4.1 Influencia de las partes de la cara

Para evaluar el desempeño de los algoritmos de reconocimiento de emociones, se diseñó un experimento controlado. El conjunto de datos utilizado consistió en 800 imágenes faciales, con 200 imágenes por cada una de las cuatro emociones estudiadas: ira, felicidad, sorpresa y tristeza. Las imágenes fueron capturadas en condiciones de iluminación y poses variadas para reflejar escenarios realistas. El conjunto de datos se dividió en dos subconjuntos: 80% para entrenamiento y 20% para pruebas, asegurando una representación equilibrada de cada emoción en ambos subconjuntos.
Los parámetros previamente utilizados lograron una precisión del 84% y 70% durante el entrenamiento del algoritmo. Sin embargo, mediante el uso de EigenFaces, es posible realizar un escalado de puntos de interés facial para determinar las zonas con mayor contribución de información. Los resultados se muestran en la tabla 1.
Las emociones se manifiestan a través de expresiones faciales que pueden involucrar varias partes del rostro. La omisión de información de una región facial específica puede tener un impacto variable dependiendo de su importancia para las emociones.

Las distintas partes del rostro tienen una influencia variable en la expresión de las emociones. Por ejemplo, la boca desempeña un papel crucial en la manifestación de la alegría, la sorpresa, la tristeza y la expresión neutral. Sin embargo, cuando se trata de emociones como el miedo, el asco, la ira y el disgusto, la boca tiene una importancia menor, lo que puede llevar a confusiones en el algoritmo si se omiten los datos de otras regiones faciales. En el caso de la tristeza, las cejas y los ojos adquieren mayor relevancia, mientras que, para la ira, el ceño fruncido es una característica distintiva. Por lo tanto, es fundamental considerar la influencia de cada parte del rostro en función de la emoción específica que se desea reconocer.

La tabla 1 muestra el porcentaje de información que aporta cada parte del rostro para el reconocimiento de emociones. Se observa que la boca es la característica que proporciona la mayor cantidad de información (73%), seguida de los ojos (64%), las cejas (48%) y, por último, la nariz (40%). Estos porcentajes reflejan la importancia relativa de cada región facial en la expresión de las distintas emociones analizadas en este estudio, como la alegría, la sorpresa, la tristeza y el enojo.

Tabla 1 Características más importantes para el reconocimiento de emociones

Característica	% de información
Cejas	48%
Nariz	40%
Ojos	64%
Boca	73%

Por lo anterior en orden de importancia, las características que proporcionan más información son: Boca, ojos, cejas y finalmente la nariz.

Los algoritmos de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y K-Vecinos fueron implementados utilizando la biblioteca Scikit-Learn en Python. Para el algoritmo SVM, se utilizó un kernel de base radial (RBF) y se realizó una búsqueda de hiperparámetros mediante validación cruzada para determinar los valores óptimos de los parámetros C y gamma. En el caso del algoritmo K-Vecinos, se exploró un rango de valores para el número de vecinos (K) y se seleccionó aquel que maximizara la precisión en el conjunto de validación.

4.2 Influencia de la boca

La boca aporta información a todas las emociones, tales como alegría, sorpresa, tristeza y neutral ya que es posible identificar dichas emociones solo con la boca. También aporta información a otras emociones tales como el miedo, el asco, la ira y el disgusto, pero con menor importancia de tal manera que cuando se utiliza únicamente la boca, la precisión baja un 20% ya que puede haber confusión.

4.3 Influencia de los ojos

Los ojos aportan información a las emociones de sorpresa y alegría. En la primera, los ojos abiertos son una de las principales características, así como en la felicidad ya que al sonreír suben los pómulos de la cara provocando que la forma de los ojos cambie.

4.4 Influencia de las cejas

Analizando las cejas se observa que aporta información a la emoción de sorpresa, ya que tienden a subir al expresar facialmente esta emoción y por tanto se incluye dicha información. Igualmente, para la emoción de ira, ya que al fruncir el ceño se diferencia de las otras.

ISSN: 2992-8338

4.5 Influencia de la nariz

La nariz es la parte del rostro que aporta la menor cantidad de información para el reconocimiento de emociones. Su contribución es mínima, principalmente en la emoción de alegría, ya que se ensancha ligeramente al sonreír. Como resultado, al prescindir de la información proporcionada por la nariz, la precisión del reconocimiento de emociones disminuye sólo marginalmente.

4.6 Evaluación del rendimiento de los algoritmos

Para evaluar exhaustivamente el rendimiento de los algoritmos de reconocimiento de emociones, se llevó a cabo un análisis comparativo considerando múltiples métricas y condiciones experimentales. Inicialmente, se examinó la influencia de cada región facial en la precisión de la clasificación de emociones, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1. Posteriormente, se realizó una evaluación comparativa del tiempo de entrenamiento y la precisión alcanzada por los algoritmos de Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y K-Vecinos, representada gráficamente en las Figuras 9, 10 y 11. Adicionalmente, se efectuó un análisis de sensibilidad con el propósito de determinar la robustez de los modelos ante variaciones en la calidad de las imágenes de entrada y la presencia de oclusiones parciales en las regiones faciales.

4.6.1 Metodología de entrenamiento

El proceso de entrenamiento de ambos algoritmos se llevó a cabo siguiendo una metodología estandarizada y rigurosa. Se utilizó un conjunto de datos compuesto por 800 imágenes faciales, abarcando de manera equilibrada las diferentes emociones objeto de estudio. Los hiperparámetros de los modelos fueron ajustados mediante técnicas de validación cruzada y búsqueda en cuadrícula, garantizando así la obtención de los valores óptimos para maximizar el rendimiento. Los parámetros predeterminados de la biblioteca scikit-learn para los algoritmos son:

- SVM: C=1, kernel='rbf', gamma = 'auto' (=1/nº atributos = 4624)
- KNN: n_neighbors = 5, weights = 'uniform'

Una vez culminado el entrenamiento, se procedió a calcular la precisión de cada algoritmo utilizando un conjunto de datos de prueba independiente, lo que permitió evaluar de manera objetiva y equitativa la capacidad de generalización de los modelos ante nuevas instancias no observadas durante la fase de aprendizaje

4.6.2 Resultados de precisión

La Tabla 2 muestra la precisión obtenida por cada uno de los modelos evaluados. El algoritmo SVM alcanzó una precisión del 71%, superando al algoritmo K-Vecinos, que obtuvo una precisión del 64%. Estos resultados indican que la Máquina de Vectores de Soporte (SVM) es más eficaz en espacios de alta dimensión, especialmente cuando hay pocas instancias de datos. Por otro lado, el rendimiento del algoritmo K-Vecinos se ve afectado cuando las distancias entre los puntos en el hiperespacio están más próximas entre sí, mientras que mantiene una alta precisión cuando los puntos se encuentran más separados.

Tabla 2 Análisis de rendimiento

Modelo	Precisión
SVM	71%
K-vecinos	64%

4.7 Evaluación del desempeño mediante matriz de confusión

Para obtener una evaluación integral del desempeño de los algoritmos, se empleó la matriz de confusión como índice de desempeño. La matriz de confusión permite visualizar la cantidad de clasificaciones correctas y erróneas para cada emoción, proporcionando una visión detallada de la precisión del modelo. Además, se calcularon métricas adicionales como la precisión (accuracy), la sensibilidad (recall) y la especificidad para cada emoción, brindando una evaluación más completa del rendimiento de los algoritmos.

4.8 Análisis comparativo de tiempo de entrenamiento y precisión

El marco de evaluación de rendimiento se centra principalmente en dos métricas clave: el tiempo de entrenamiento y la precisión de los algoritmos. Al realizar la prueba de tiempo de entrenamiento, se observa que el algoritmo de K-Vecinos tiene una diferencia de tiempo de 4.5 segundos, con un tiempo total de 49.20 segundos, en comparación con el algoritmo SVM, que presenta un tiempo de 44.04 segundos (consulte la Figura 7). Ambos algoritmos fueron evaluados utilizando un conjunto de datos compuesto por 800 imágenes, con 200 imágenes por cada emoción capturada.

Este análisis comparativo permite evaluar la eficiencia y el rendimiento de los algoritmos de reconocimiento de emociones desde una perspectiva cuantitativa. El tiempo de entrenamiento es un factor crucial, ya que refleja la capacidad de los algoritmos para adaptarse y aprender de los datos de entrenamiento de manera oportuna. Una diferencia de 10.3 segundos en el tiempo de entrenamiento entre los algoritmos de K-Vecinos y SVM puede ser significativa, dependiendo de los requisitos específicos del proyecto y las restricciones de tiempo.

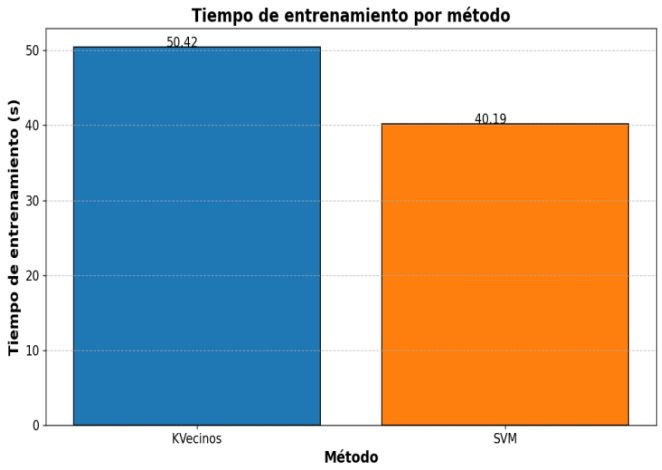


Figura 7. Comparación de tiempo de entrenamiento de algoritmos

ISSN: 2992-8338

Para evaluar y comparar la precisión de los algoritmos de reconocimiento de emociones, se aplicó una estrategia consistente. En este caso, se realizó una prueba de detección durante un período de 40 segundos, cambiando la expresión facial cada 10 segundos. Los resultados obtenidos se presentaron en gráficos de barras, tanto para el algoritmo de K-Vecinos (véase la Figura 8) como para el algoritmo SVM (véase la Figura 9). Este enfoque metodológico permite una evaluación sistemática y controlada de la precisión de los algoritmos. Al mantener un período de prueba constante de 40 segundos y cambiar las expresiones faciales a intervalos regulares de 10 segundos, se garantiza una comparación equitativa entre los algoritmos. Esto asegura que ambos métodos sean evaluados bajo las mismas condiciones y con un número igual de cambios de expresión facial.

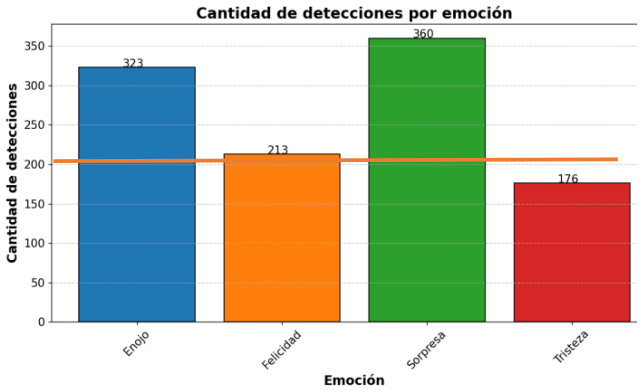


Figura 8. Resultado del análisis de precisión del algoritmo de SVM

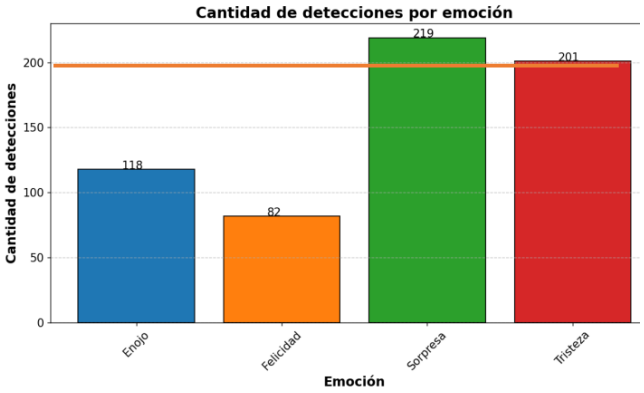


Figura 9. Resultado del análisis de precisión del algoritmo de K-Vecinos

De acuerdo con los resultados de precisión obtenidos al considerar 200 decisiones, se observa que la curva de precisión es más cercana al usar el algoritmo SVM en comparación con el algoritmo de K-Vecinos. Este análisis basado en la cantidad de decisiones tomadas proporciona una perspectiva clara sobre la eficacia y consistencia de los algoritmos evaluados. La proximidad de la curva de precisión al utilizar el algoritmo SVM sugiere una mayor estabilidad y exactitud en las decisiones tomadas en comparación con el algoritmo de K-Vecinos. La mayor cercanía de la curva de precisión al utilizar el algoritmo SVM indica una mayor coherencia en la precisión de las decisiones tomadas, lo cual es un factor clave en la evaluación y selección de algoritmos para aplicaciones de reconocimiento de emociones.

5. CONCLUSIONES

Tras un exhaustivo análisis de diversos algoritmos, se destaca inequívocamente la eficacia del algoritmo de Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) como el más sobresaliente en términos de precisión y eficiencia computacional. Los resultados demuestran que el algoritmo SVM es especialmente idóneo para el procesamiento de imágenes de baja resolución, alcanzando una precisión del 71%, lo que lo sitúa por encima de su contraparte, el algoritmo de K-Vecinos, cuya precisión se estima en un 64%.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el algoritmo de Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) supera al algoritmo de K-Vecinos en términos de precisión en la tarea de reconocimiento de emociones. La diferencia de rendimiento entre ambos algoritmos puede atribuirse a varios factores. En primer lugar, el algoritmo SVM tiene la capacidad de manejar eficazmente conjuntos de datos de alta dimensionalidad, como es el caso de las imágenes faciales, al encontrar un hiperplano óptimo que separa las diferentes clases emocionales en el espacio de características. Además, el uso de un kernel de base radial (RBF) en el algoritmo SVM permite capturar relaciones no lineales entre las características faciales y las emociones correspondientes. Por otro lado, el algoritmo de K-Vecinos se basa en la similitud entre los puntos de datos en el espacio de características, lo que puede verse afectado por la presencia de ruido o variaciones en las expresiones faciales. Estos factores pueden contribuir a la menor precisión observada en el algoritmo de K-Vecinos en comparación con el algoritmo SVM. No obstante, es importante destacar que ambos algoritmos logran una precisión superior al 60%, lo que indica su efectividad en la tarea de reconocimiento de emociones a partir de imágenes faciales de baja resolución. Estos resultados resaltan la viabilidad de utilizar algoritmos de aprendizaje automático en combinación con hardware de recursos limitados para desarrollar sistemas de reconocimiento de emociones eficientes y accesibles.

Por lo anterior se demuestra que dispositivos con recursos de hardware limitados y cámaras de baja resolución pueden explotar eficazmente estos algoritmos. Además, abre la puerta a futuras investigaciones al evidenciar que no es necesario contar con imágenes de alta resolución o hardware sofisticado para obtener resultados satisfactorios.

ISSN: 2992-8338

REFERENCIAS

Andrango Calvachi, M. A. (2019). Uso de reconocimiento facial de emociones basado en técnicas de Deep Learning para el mejoramiento de la educación [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica Israel]. Repositorio Digital Universidad Tecnológica Israel. http://repositorio.uisrael.edu.ec/handle/47000/2297

Pinzón Naranjo, J. D. (2021). Desarrollo de sistema para la detección de emociones utilizando visión artificial e inteligencia artificial aplicado a entornos educativos [Tesis de pregrado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Institucional de la Universidad de Pamplona. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/688/1/Pinzon_2020_TG.pdf

Medina, M. G. (2020). Inteligencia emocional artificial [Tesis de pregrado, Universidad Jorge Tadeo Lozano]. Repositorio de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. http://hdl.handle.net/20.500.12010/16617

Paricela Canazas, A., Ramos Blaz, J. J., Torres Martínez, P. D., & Jaquehua Mamani, X. (2022). Sistema de identificación de emociones a través de reconocimiento facial utilizando inteligencia artificial. Innovación y Software, 3(2), 140-150. https://doi.org/10.48168/innosoft.s9.a74

Avilés Valencia, J. H., Centeno Alomoto, M. G., Encarnación Umatambo, M. L., & Trujillo Quinto, W. A. (2022). Construcción de una app nativa Android para la detección facial de emociones usando técnicas de inteligencia artificial. Pro Sciences: Revista De Producción, Ciencias E Investigación, 6(45), 52-61. https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol6iss45.2022pp52-61

Flores Masias, E. J., Livia Segovia, J. H., García Cacique, A., & Dávila Díaz, M. E. (2023). Análisis de sentimientos con inteligencia artificial para mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje en el aula virtual. PUBLICACIONES, 53(2), 185-216. https://doi.org/10.30827/publicaciones.v53i2.26825

ISSN: 2992-8338

Evaluation of the correlation models used in bone remodeling

Jesús E. Cruz-Robles*, Arturo Abúndez-Pliego*, Javier A. Pérez-Molina*

**Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Prolongación Palmira Esq. Apatzingán S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, 62480, México; (m22ce030@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx, d22ce032@cenidet.tecnm.mx).*

Abstract: In this work, a review on the bone density-elasticity modulus correlation was conducted, and an assessment of their influence on bone remodeling process was performed. These models are based on the bone remodeling process, in which every author used different approaches and considering different variables to propose a correlation model. Using finite element analysis, was performed a simulation of the bone remodeling process to each correlation model and using strain energy density to calculate the rate of change of the bone density in each iteration. The obtained results show differences in every correlation model, nevertheless, the results obtained by the correlation proposed by Carter is more precise, if it is compared with the reported data by Caeiro.

Keywords: Bone remodeling, Finite Element, Elasticity Modulus, Bone Density.

1. INTRODUCCIÓN

La remodelación ósea se refiere al proceso natural de los huesos en el que las células óseas se encargan de generar tejido nuevo para mantener en óptimas condiciones a los huesos (Fang, 2013). Este proceso de remodelación puede verse afectado por distintos factores como la deficiencia de vitaminas y minerales, sedentarismo, el consumo prolongado de algunos medicamentos, etc. (Calvo-Gallego *et al.*, 2022a). Aproximadamente en el siglo XIX se hizo el planteamiento de la relación que existe entre la densidad ósea y las cargas que deben soportar los huesos. Galileo Galilei fue el pionero en hacer una observación en este tema al plantear la idea de que los huesos de los animales más grandes poseen mayor resistencia en comparación con los animales más pequeños (Forriol, 2001).

El estudio de las propiedades mecánicas de los huesos comenzó con Wertheim en 1847 (Forriol, 2001) y en 1895 Roux (Roux, 1895) profundizó en el tema, planteando el concepto de la mecánica del desarrollo óseo. Su teoría consistía en que por medio de la *adaptación funcional* el esqueleto se diseña así mismo dependiendo las influencias mecánicas de actividades cotidianas (Roux, 1895) y afirmando que la remodelación ósea es un proceso continuo regulado por células óseas (Wolff, 1893; Mullender and Huiskes, 1995). Por otra parte, Julius Wolff, en 1867 tomó como base el trabajo de Von Meyer para explicar de manera experimental y analítica que el hueso puede modificarse de manera interna y externa al reorientar las trabéculas. Años después, Friedrich Pauwels comprobó la teoría de histogénesis casual y la adaptación funcional de los huesos (Pauwels, 1980). Esta teoría explica que la densidad ósea no es homogénea en todo el hueso y se distribuye dependiendo de la concentración de esfuerzos, permitiéndole al hueso modificar su densidad hasta llegar a un punto de equilibrio sin modificar su forma (Wolff, 1893; Pauwels, 1980).

Diversos autores se enfocaron en dar una relación matemática a las observaciones cualitativas de Wolff. En 1964, Frost propuso una relación matemática a la denominada *ley de Wolff* (Tonna, 1964; Frost, 1965). Frost hace énfasis en que el proceso de remodelación es dinámico y las células actúan como sensores. Posteriormente en 1975, Cowin y Hegedus comprobaron que, un aumento en la concentración de esfuerzos genera mayor deformación en el hueso. El cual adapta su densidad en función de la magnitud de los esfuerzos. Esta observación les permitió establecer una relación entre las propiedades mecánicas del hueso y la densidad ósea (Cowin and Hegedus, 1976).

En este trabajo se presenta una revisión de diferentes modelos de correlación entre la densidad ósea y el módulo elástico en los huesos. Se hace la comparativa discutiendo las semejanzas y diferencias en cuatro de ellos, para lo cual, se emplearon propiedades de materiales y de contacto presentes en la literatura para la interfaz hueso-implante en la simulación del proceso de remodelación. Los cuatro modelos de correlación se plantean de manera diferente, lo que hace que presenten una tendencia de correlación diferente. En los cuatro modelos de correlación, se asignaron las mismas propiedades para simular la interfaz hueso-implante en condiciones generales. El objetivo del trabajo consiste en conocer y discutir algunos de los enfoques existentes para correlacionar la densidad ósea y el módulo elástico, así como la influencia que tienen en la simulación del proceso de remodelación en la interfaz hueso-implante. Esta revisión puede ser de utilidad para la selección del modelo de correlación que mejor complemente a la simulación del proceso de remodelación.

ISSN: 2992-8338

2. LA BIOMECÁNICA DEL HUESO

El concepto de remodelación ósea se refiere a la formación de tejido óseo nuevo, este proceso es constante en nuestro sistema musculoesquelético y es el resultado de la interacción de las células óseas fundamentales; los osteoclastos se encargan de eliminar el tejido óseo dañado (resorción) que fue identificado por los osteocitos para posteriormente la formación de tejido óseo nuevo por los osteoblastos (Figura 1) (Moreira, Dempster and Baron, 2000).

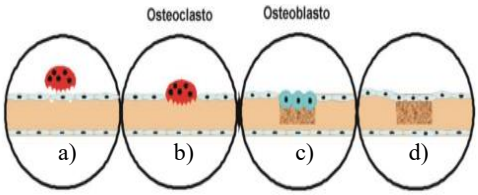


Figura 1. Proceso de remodelación; a) Activación de la resorción, b) Eliminación del teijo óseo, c) Generación de tejido óseo, d) Fase de reposo (Moreira, Dempster and Baron, 2000).

2.1 Proceso de remodelación

El modelo que describe el proceso de remodelación se basa en que las células óseas regulatorias (osteoblasto, osteoclasto y osteocitos) funcionan como sensores que detectan un estímulo. Mantener el cuerpo en movimiento aplica diferentes cargas mecánicas al sistema musculoesquelético (Figura 2), generando esfuerzos (σ) y deformaciones (ε) (Weinans, Huiskes and Grootenboer, 1992). Las deformaciones se presentan en la estructura interna y externa del hueso (Figura 3).

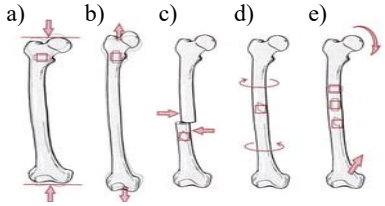


Figura 2. Carga aplicada sobre la tibia, a) Compresión, b) Tensión, c) Cizalladura, d) Torsión, e) Flexión (Drake, Vogl and Mitchell, 2021).

El estímulo mecánico puede propiciar que el hueso aumente su densidad y por lo tanto su resistencia (ver Figura 4). El cambio de densidad se define como la razón de cambio de la densidad ósea en función del tiempo $\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}t$. La relación entre la razón de cambio de la densidad ósea y el estímulo mecánico se describe como:

$$\frac{d\rho}{dt} = B(S - k) \tag{1}$$

Donde: B es una constante determinada experimentalmente (Tonna, 1964), S es el estímulo mecánico y k es el valor de referencia al que tiende S. Huiskes (Huiskes *et al.*, 1987) consideraron la densidad de energía de deformación (U) como el estímulo mecánico S; U se define como el almacenamiento de energía por unidad de volumen, y se representa como:

$$U = \frac{\sigma\varepsilon}{2} \tag{2}$$

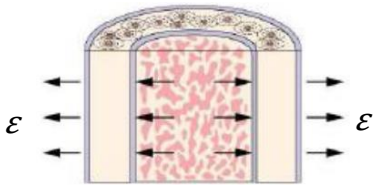


Figura 3. Deformación en el tejido cortical y esponjoso (Drake, Vogl and Mitchell, 2021).

La Figura 3 representa las deformaciones en la estructura interna y externa del hueso debido a una carga. El cálculo de la deformación, se puede definir como la relación entre el esfuerzo y el módulo elástico, y se representa como:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{3}$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (2), la densidad de energía de deformación U ahora se represneta como:

$$U = \frac{\sigma^2}{2E} \tag{4}$$

Donde: E es el módulo de elástico del material.

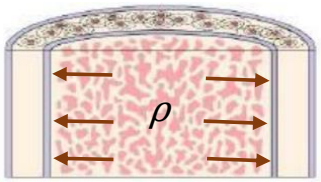


Figura 4. Adaptación del tejido óseo a las solicitaciones mecánicas (Drake, Vogl and Mitchell, 2021).

Los huesos reciben múltiples beneficios de la estimulación mecánica, una de ellas es el aumento de densidad ósea (ρ), como se observa en la figura 4. Al utilizar la densidad de energía de deformación por unidad de masa ósea U/ρ como estímulo mecánico (Fyhrie and Carter, 1990) la Ecuación (1) ahora se representa como:

$$\frac{d\rho}{dt} = B\left(\frac{U}{\rho} - k\right) \tag{5}$$

Resolviendo la ecuación (5) mendiante la integración de Euler y utilizando un valor de tiempo constante se obtiene la ecuación (6) (Weinans, Huiskes and Grootenboer, 1992):

$$\Delta\rho = B\Delta t\left(\frac{U}{\rho} - k\right) \tag{6}$$

Donde: Δt=30 son unidades arbitrarias de tiempo (ut), $B = 0.05(gcm^{-3})^2(MPa \cdot ut)^{-1}$ y k=0.14 ($\mathrm{Jg^{-1}}$) (Jia *et al.*, 2017a).

En la Figura 5 se presenta el diagrama de la metodología propuesta para la remodelación ósea por diversos autores

ISSN: 2992-8338

(Weinans, Huiskes and Grootenboer, 1992; Jia et al., 2017; Calvo-Gallego et al., 2022).

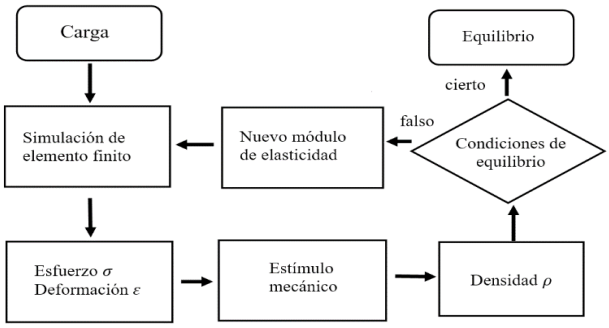


Figura 5. Diagrama de flujo de remodelación ósea en combinación con simulación por elementos finitos.

La simulación del proceso de remodelación se detiene cuando se alcanzan las condiciones de equilibrio presentadas en la ecuación (7) (Jia et al., 2017).

$$\frac{U}{\rho} = k \;\; o \;\; \rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max} \tag{7}$$

Donde: $\rho_{min} = 0.01\ g/cm^3$ y $\rho_{max} = 1.94\ g/cm^3$.

2.2 Modelo de correlación de Carter y Hayes

Carter y Hayes (Carter and Hayes, 1977) realizaron pruebas en huesos humanos y bovinos aplicando una carga a compresión para determinar la correlación empírica entre la densidad ósea, la resistencia a la compresión del hueso, módulo elástico y deformación, permitiéndoles proponer un modelo de correlación que representa la influencia de la densidad ósea sobre la resistencia de los huesos (ecuación 8). Sus pruebas experimentales determinaron otros factores que afectan a las propiedades mecánicas del hueso, como el tamaño, espesor y dirección de las trabéculas en el tejido esponjoso.

$$E_{Carter} = 3790\rho^3 \tag{8}$$

2.3 Modelo de correlación de Jacobs

Los hallazgos de Jacobs (Jacobs *et al.*, 1995) consisten en que, mediante herramientas computacionales aplicadas sobre un modelo de fémur bidimensional, plantearon un modelo de correlación entre la densidad ósea y el módulo elástico (ecuación 9). El objetivo principal fue analizar el modelo de correlación de Carter, observando que la orientación de las trabéculas influye en el proceso de remodelación del hueso en casos específicos y complementando con una nueva correlación entre la densidad ósea y el coeficiente de Poisson (v), representada en la ecuación (10). Jacobs reporta que las trabéculas con mayor resistencia están alineadas con la dirección del mayor esfuerzo aplicado sobre el hueso.

$$E_{Jacobs} = \begin{Bmatrix} 2014\rho^{2.5} \;\; si \;\; \rho \leq 1.2\ g/cm^3 \\ 1763\rho^{3.5} \;\; si\ \rho > 1.2\ g/cm^3 \end{Bmatrix} \tag{9}$$

$$v = \begin{Bmatrix} 0.2 \;\; si \;\; \rho \leq 1.2\ g/cm^3 \\ 0.32 \;\; si\ \rho > 1.2\ g/cm^3 \end{Bmatrix} \tag{10}$$

2.3 Modelo de correlación de Hernández

Hernández (Hernández et al., 2001) remarca en su investigación que aún no hay una explicación certera de la interacción entre la densidad ósea y el contenido mineral, y como la sinergia de ambas influye sobre las propiedades mecánicas del hueso. Apoyándose en los datos obtenidos por Keller (Keller, 1994), Hernández planteo un modelo de correlación (ecuación 11), para el cálculo del módulo de elástico que considere la densidad ósea y el contenido mineral.

$$E_{Hernández} = 3388\rho^{2.58} \tag{11}$$

2.4 Modelo de correlación de Zhu

Fang *et al.* (Fang et al., 2013b) y Jia *et al.* (Jia et al., 2017b) reportaron el modelo propuesto por Zhu (Zhu, 2003), el cual describe la relación entre el módulo elástico y la densidad ósea (ecuación 12) de acuerdo con la adaptación de la microestructura interna de los huesos (hueso cortical). En la investigación dirigida por Fang (Fang et al., 2013), menciona que la expresión de Zhu es más específica en describir la correlación de ambas propiedades al establecer un mayor número de límites y ecuaciones.

$$E_{Zhu} = \begin{Bmatrix} 1007\rho^2 \; si \; \rho \leq 0.25\ g/cm^3 \\ 255\rho \; si \; 0.25 < \rho \leq 0.4\ g/cm^3 \\ 2972\rho^2 - 933\rho \; si \; 0.4 < \rho \leq 1.2\ g/cm^3 \\ 1763\rho^{3.25} \; si \; \rho > 1.2\ g/cm^3 \end{Bmatrix} \tag{12}$$

2.5 Comparativa de los modelos presentados

La **Tabla 1**, muestra los valores obtenidos por Caeiro *et al.* (Caeiro, González and Guede, 2013) en la caracterización de la resistencia máxima del hueso bajo diferentes ensayos mecánicos y el módulo elástico para cada ensayo. En su investigación describe que la variación de los valores se debe a la porosidad y edad de la muestra.

Tabla 1. Valores de resistencia máxima y módulo elástico del hueso humano para distintos tipos de ensayos (Caeiro, González and Guede, 2013).

Ensayos de compresión	Resistencia	167-213 MPa
	Módulo elástico	14.7-34.3 GPa
Ensayos de tracción	Resistencia	107-170 MPa
	Módulo elástico	11.4-29.2 GPa
Ensayos de flexión	Resistencia	103-238 MPa
	Módulo elástico	9.8-15.7 GPa

En la Figura 6, se presenta una comparativa de los modelos de correlación presentados. Los resultados muestran una similitud en la tendencia de las curvas. Sin embargo, los valores del módulo elástico divergen para una densidad ósea de 1 g/cm^3 en los modelos de Carter y Hernández, y de 1.2 g/cm^3 en los modelos de Jacobs y Zhu; aunque se debe mencionar que la variación es menor para el último caso.

ISSN: 2992-8338

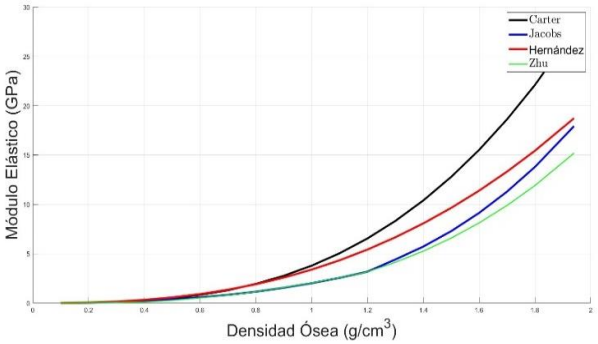


Figura 6. Comportamiento del módulo elástico en función de la densidad ósea.

3. SIMULACIÓN NÚMERICA DE LOS MODELOS DE CORRELACIÓN

Se generaron modelos tridimensionales en software CAD (diseño asistido por computadora, por sus siglas en inglés) de la tibia y de la prótesis para representar la interfaz hueso implante en una simulación por elementos finitos del proceso de remodelación ósea. A partir de lo reportado por Abúndez (Abúndez, 2010) se recabo información necesaria para las dimensiones del componente tibial de una prótesis de rodilla y así tener un modelo 3D realizado en el software SolidWorks 2021 (Dassault Systèmes, SolidWorks Corp.) (Figura 7ª). El vástago tiene una longitud de 36 mm, un diámetro de 15 mm, y un área de la placa de aproximadamente 2500 mm^2. La Figura 7b, muestra el modelo de la tibia realizado en el software Blender 3.6 (Blender Foundation) y se modelo tomando de referencia los datos reportados por Hernández *et al*. (Mantilla Hernández, Cárdenas Durán and Jácome Bohórquez, 2009) y literatura en anatomía (Amerman, 2010; Drake, Vogl and Mitchell, 2021; Mantilla Hernández, Cárdenas Durán and Jácome Bohórquez, 2009).

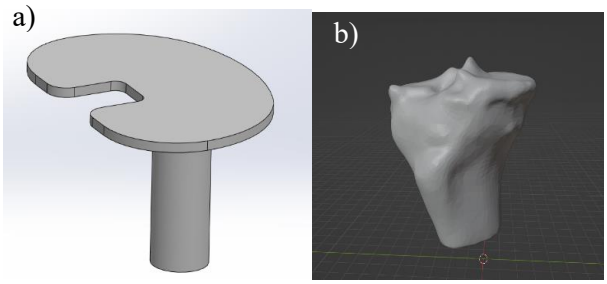


Figura 7. a) Vista isométrica del implante tibial en el software SolidWorks, b) Modelo de la tibia en software Blender.

Se exportaron los modelos de la tibia y el implante tibial al software Abaqus 2017 (Dassault Systèmes, Simulia) (Figura 8), donde se realizó el ensamble de ambos para añadir propiedades de contacto en la interfaz hueso-implante; se especificó un ajuste por interferencia de 0.5 mm en el ensamble (Campi *et al.*, 2018), además de agregar condiciones de atadura entre la placa tibial y la tibia (Scott et al., 2017).

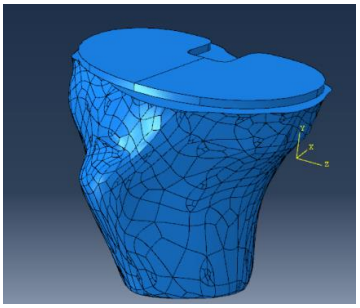


Figura 8. Ensamble de prótesis y tibia en software Abaqus.

Kutzner reporta (Kutzner *et al.*, 2010) que las actividades cotidianas darán la pauta para la adaptación de la densidad ósea en los huesos. Además, reportó la distribución y la magnitud de las cargas que actúan sobre la superficie del implante en 8 actividades cotidianas. Para la simulación por elementos finitos se tomó el punto con mayor carga sobre la tibia en el ciclo de marcha, alcanzando un valor de 2.97 veces el peso del cuerpo con una distribución de la carga del 60% sobre el cóndilo medial y 40% en el cóndilo lateral. El peso establecido para la simulación del proceso de remodelación es de 90 kg y tomando los datos reportados por Kutzner, la carga que debe soportar el cóndilo medial (F_{medial}) y el cóndilo lateral ($F_{lateral}$) es de 1,573.32 N y 1,048.88 N respectivamente (Figura 9a). La Figura 9b muestra el mallado del ensamble con un total de 121 mil elementos en el ensamble.

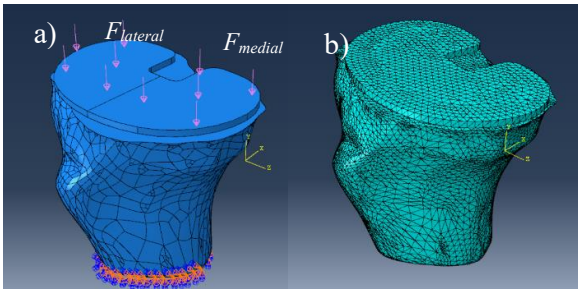


Figura 9. a) Cargas aplicadas sobre la placa tibial de la prótesis, b) Mallado del ensamble para simulación por elementos finitos.

Se establecieron dos regiones de interés en el modelo de la tibia para la simulación del proceso de remodelación, esto permite delimitar los valores de esfuerzo en el cálculo de la densidad de energía de deformación. Las regiones de interés se dividieron en región de interés medial (ROI-M) y región de interés lateral (ROI-L). Las ROIs se situaron un centímetro debajo de la placa tibial y con un centímetro de separación de la interfaz hueso-implante (Figura 10) (Hernández-Vaquero et al., 2008). Las regiones de interés permiten al especialista interpretar la interacción entre el implante y la tibia, y dar un diagnóstico preliminar de resorción o formación ósea (EWALD, 1989).

ISSN: 2992-8338

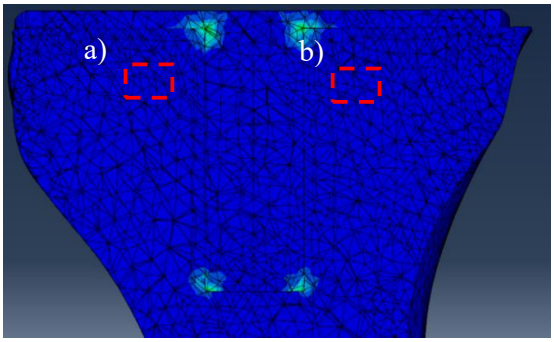


Figura 10. Modelo de simulación de la interfaz hueso-implante, a) Región de interés medial, b) Región de interés lateral.

3.2 Sensibilidad del mallado

En las simulaciones de elementos finitos, existen dos factores de gran relevancia para la exactitud de los resultados, el tipo y el número de elementos empleados. En la literatura referente a simulaciones de la interfaz hueso-implante, se ha reportado el uso de elementos tetraédricos a causa de su mejor adaptación a geometrías irregulares (Cawley et al., 2012; Jia et al., 2017; Quilez, Seral and Pérez, 2017; Innocenti, Bori and Pianigiani, 2022). Sin embargo, existe disparidad en el número de elementos utilizados. Con base en la literatura reportada, se emplean elementos finitos tetraédricos para le mallado de la interfaz hueso-implante en el modelo del presenta trabajo. Para la selección del número de elementos, en la Figura 11 se presenta un análisis de refinamiento de malla, al medir la convergencia del esfuerzo en la región de interés, empleando elementos tetraédricos C3D10 de orden cuadrático, para una densidad y módulo de elasticidad constante de 0.8 g/cm^3 y 1.94 GPa, respectivamente. Como se observa en la Figura 11 a partir de 115 mil la variación entre los resultados es menor al 1%. Por lo tanto, se estableció un número de 121 mil elementos para las simulaciones.

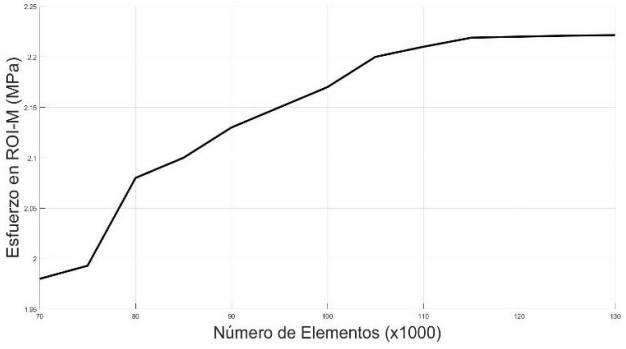


Figura 11. Refinamiento del mallado para la simulación del proceso de remodelación.

3.1 Materiales

Los materiales para implantes deben cumplir con pruebas de resistencia y *biocompatibilidad* como la aleación de titanio, aluminio y vanadio (Ti6Al4V) utilizado en implantes ortopédicos e implantes dentales (Saini *et al.*, 2015), esta aleación posee un módulo elástico de 110 GPa y un coeficiente de Poisson de 0.3 (Jia et al., 2017). Por otra parte, el hueso está conformado por un tejido trabecular y cortical, ambos con diferentes propiedades mecánicas. Sin embargo, para la simulación de remodelación puede considerarse un solo tejido y con propiedades homogéneas (Jia et al., 2017). Se estableció una densidad ósea inicial de 0.8 g/cm^3 y la **Tabla 2**, enlista el cálculo del módulo elástico para cada modelo de correlación.

Tabla 2. Cálculo del módulo elástico inicial para cada modelo.

Ecuaciones	Modelo	Módulo elástico inicial
Ecuación 8	$E_{Carter} = 3790\rho^3$	1.94 GPa
Ecuación 9	$E_{Jacobs} = 2014\rho^{2.5}$	1.152 GPa
Ecuación 11	$E_{Hernández} = 3388\rho^{2.58}$	1.9 GPa
Ecuación 12	$E_{Zhu} = 2972\rho^2 - 933\rho$	1.55 GPa

4. COMARATIVA DE LOS MODELOS DE CORRELACIÓN.

En las Figura 12 y Figura 13, se presentan los resultados de la simulación, haciendo una comparación entre los cuatro modelos de correlación descritos previamente. En las gráficas se observa el aumento del módulo elástico en ROI-M y ROI-L conforme se incrementa el número de iteraciones, así como una tendencia similar entre las curvas para ambas zonas de interés. Al analizar los resultados, se observó que el modelo de correlación de Carter representa de mejor manera el proceso de remodelación ósea, tendiendo a un valor promedio de los datos reportados por Caeiro (Caeiro, González and Guede, 2013) para el valor del módulo elástico en ensayos a compresión.

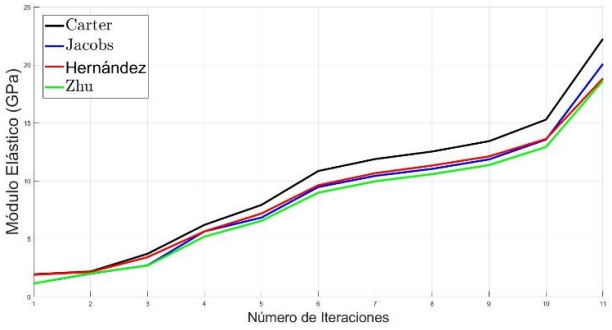


Figura 12. Curvas del proceso de remodelación en la ROI-M.

ISSN: 2992-8338

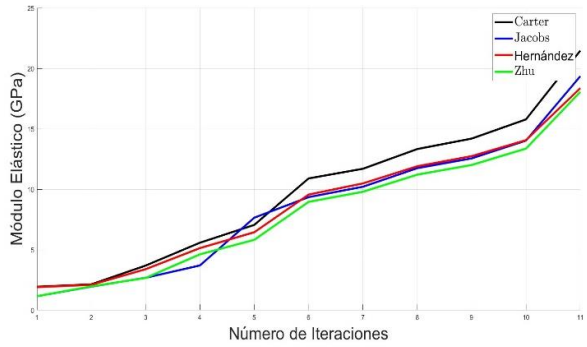


Figura 13. Curvas del proceso de remodelación en la ROI-L.

5. CONCLUSIONES

Se realizaron simulaciones de elementos finitos para comparar los modelos de remodelación ósea, para el caso de la carga máxima provocada por el ciclo de marcha en la interfaz hueso-implante. De los modelos analizados, la correlación de Carter representa el proceso de remodelación de forma más fiel a la realidad, a causa de que los resultados obtenidos caen en un valor intermedio de los reportados por Caeiro. En contraste, se identificó que el modelo de Zhu es más conservador, puesto que genera resultados cercanos al límite inferior reportado por Caeiro. Por lo tanto, las simulaciones de remodelación ósea deben realizarse empleando la correlación de Carter.

AGRADECIMIENTOS

Jesús E. Cruz Robles expresa su reconocimiento y agradecimiento al CONACYT por la beca número 998854 otorgada para sus estudios de maestría

REFERENCIAS

Abúndez, A. (no date) *Desarrollo de un Sistema Compuesto, Amortiguado y de Bajo Par Friccional para Aplicación en Prótesis de Rodilla*. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Amerman, E.C. (no date) *Exploring Anatomy Physiology in the Laboratory*.

Caeiro, J.R., González, P. and Guede, D. (2013) 'Biomecánica y hueso (y II): ensayos en los distintos niveles jerárquicos del hueso y técnicas alternativas para la determinación de la resistencia ósea', *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*, 5(2), pp. 99–108. Available at: https://doi.org/10.4321/S1889-836X2013000200007.

Calvo-Gallego, J.L. *et al.* (2022) 'The Correlation between Bone Density and Mechanical Variables in Bone Remodelling Models: Insights from a Case Study Corresponding to the Femur of a Healthy Adult', *Mathematics*, 10(18), p. 3367. Available at: https://doi.org/10.3390/math10183367.

Campi, S. *et al.* (2018) 'Optimal interference of the tibial component of the cementless Oxford Unicompartmental Knee Replacement', *Bone & Joint Research*, 7(3), pp. 226–231. Available at: https://doi.org/10.1302/2046-3758.73.BJR-2017-0193.R1.

Carter, D. and Hayes, W. (1977) 'The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure', *The Journal of Bone & Joint Surgery*, 59(7), pp. 954–962. Available at: https://doi.org/10.2106/00004623-197759070-00021.

Cawley, D.T. *et al.* (2012) 'Full and surface tibial cementation in total knee arthroplasty: A biomechanical investigation of stress distribution and remodeling in the tibia', *Clinical Biomechanics*, 27(4), pp. 390–397. Available at: https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2011.10.011.

Cowin, S.C. and Hegedus, D.H. (1976) 'Bone remodeling I: theory of adaptive elasticity', *Journal of Elasticity*, 6(3), pp. 313–326. Available at: https://doi.org/10.1007/BF00041724.

Drake, R.L., Vogl, W. and Mitchell, A.W.M. (no date) *Gray. Atlas de Anatomía*.

EWALD, F.C. (1989) 'The Knee Society Total Knee Arthroplasty Roentgenographic Evaluation and Scoring System', *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 248(NA;), p. 9???12. Available at: https://doi.org/10.1097/00003086-198911000-00003.

Fang, J. *et al.* (2013) 'Simulation on the internal structure of three-dimensional proximal tibia under different mechanical environments', *BioMedical Engineering OnLine*, 12(1), p. 130. Available at: https://doi.org/10.1186/1475-925X-12-130.

Forriol, F. (2001) 'Respuesta ósea a las solicitaciones mecánicas en condiciones fisiológicas', *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 45(3), pp. 258–265. Available at: https://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-cirugia-ortopedica-traumatologia-129-articulo-respuesta-osea-solicitaciones-mecanicas-condiciones-13015932.

Frost, H.M. (1965) 'The Laws of Bone Structure', *The American Journal of the Medical Sciences*, 249(2), p. 245. Available at: https://doi.org/10.1097/00000441-196502000-00053.

Fyhrie, D.P. and Carter, D.R. (1990) 'Femoral head apparent density distribution predicted from bone stresses', *Journal of Biomechanics*, 23(1), pp. 1–10. Available at: https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90363-8.

Hernandez, C.J. *et al.* (2001) 'The influence of bone volume fraction and ash fraction on bone strength and modulus', *Bone*, 29(1), pp. 74–78. Available at: https://doi.org/10.1016/S8756-3282(01)00467-7.

Hernandez-Vaquero, D. *et al.* (2008) 'Influence of the tibial stem design on bone density after cemented total knee arthroplasty: a prospective seven-year follow-up study', *International Orthopaedics*, 32(1), pp. 47–51. Available at: https://doi.org/10.1007/s00264-006-0280-y.

ISSN: 2992-8338

Huiskes, R. *et al.* (1987) 'Adaptive bone-remodeling theory applied to prosthetic-design analysis', *Journal of Biomechanics*, 20(11–12), pp. 1135–1150. Available at: https://doi.org/10.1016/0021-9290(87)90030-3.

Innocenti, B., Bori, E. and Pianigiani, S. (2022) 'Biomechanical Analysis of the Use of Stems in Revision Total Knee Arthroplasty', *Bioengineering*, 9(6), p. 259. Available at: https://doi.org/10.3390/bioengineering9060259.

Jacobs, C.R. *et al.* (1995) 'Numerical instabilities in bone remodeling simulations: The advantages of a node-based finite element approach', *Journal of Biomechanics*, 28(4), pp. 449–459. Available at: https://doi.org/10.1016/0021-9290(94)00087-K.

Jia, Z. *et al.* (2017) 'Influence of design features of tibial stems in total knee arthroplasty on tibial bone remodeling behaviors', *Medical Engineering & Physics*, 48, pp. 103–113. Available at: https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2017.06.046.

Keller, T.S. (1994) 'Predicting the compressive mechanical behavior of bone', *Journal of Biomechanics*, 27(9), pp. 1159–1168. Available at: https://doi.org/10.1016/0021-9290(94)90056-6.

Kutzner, I. *et al.* (2010) 'Loading of the knee joint during activities of daily living measured in vivo in five subjects', *Journal of Biomechanics*, 43(11), pp. 2164–2173. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.03.046.

Mantilla Hernández, J.C., Cárdenas Durán, N. and Jácome Bohórquez, J.M. (2009) 'Estimación de la Talla a Partir de la Medida de la Tibia en Población Colombiana', *International Journal of Morphology*, 27(2). Available at: https://doi.org/10.4067/S0717-95022009000200004.

Moreira, C.A., Dempster, D.W. and Baron, R. (2000) *Anatomy and Ultrastructure of Bone – Histogenesis, Growth and Remodeling*.

Mullender, M.G. and Huiskes, R. (1995) 'Proposal for the regulatory mechanism of Wolff's law', *Journal of Orthopaedic Research*, 13(4), pp. 503–512. Available at: https://doi.org/10.1002/jor.1100130405.

Pauwels, F. (1980) *Biomechanics of the Locomotor Apparatus*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-67138-8.

Quilez, M.P., Seral, B. and Pérez, M.A. (2017) 'Biomechanical evaluation of tibial bone adaptation after revision total knee arthroplasty: A comparison of different implant systems', *PLOS ONE*, 12(9), p. e0184361. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184361.

Roux, W. (1895) *Gesammelte Abhandlungen über Entwickelungsmechanik der Organismen / von Wilhelm Roux.* Leipzig : Wilhelm Engelmann,. Available at: https://doi.org/10.5962/bhl.title.9169.

Saini, M. *et al.* (2015) 'Implant biomaterials: A comprehensive review.', *World journal of clinical cases*, 3(1), pp. 52–7. Available at: https://doi.org/10.12998/wjcc.v3.i1.52.

Scott, C.E.H. *et al.* (2017) 'Metal-backed *versus* all-polyethylene unicompartmental knee arthroplasty', *Bone & Joint Research*, 6(1), pp. 22–30. Available at: https://doi.org/10.1302/2046-3758.61.BJR-2016-0142.R1.

Tonna, E.A. (1964) 'Mathematical Elements of Lamellar Bone Remodelling', *Journal of Gerontology*, 19(4), pp. 523–523. Available at: https://doi.org/10.1093/geronj/19.4.523.

Weinans, H., Huiskes, R. and Grootenboer, H.J. (1992) 'The behavior of adaptive bone-remodeling simulation models', *Journal of Biomechanics*, 25(12), pp. 1425–1441. Available at: https://doi.org/10.1016/0021-9290(92)90056-7.

Wolff, J. (1893) 'Das Gesetz der Transformation der Knochen', *DMW - Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 19(47), pp. 1222–1224. Available at: https://doi.org/10.1055/s-0028-1144106.

Zhu, X.-H. (2003) 'Application of subsectional relationship between elastic modulus and apparent density in the structural simulation of proximal femur', *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 22(3), pp. 250–257.

ISSN: 2992-8338

Alternativas electromecánicas para el control del temblor causado por la enfermedad del Parkinson y Temblor Esencial

David Navarrete-parada*, Jorge Colín-Ocampo*, Arturo Abúndez-Pliego*, H. Andrés-Mauricio*, Andrés C-Rodríguez*, A. Almaraz-Martinez

**Tecnológico Nacional de México/ CENIDET*

Int. Internado palmira, Cuernavaca, Morelos. CP 62490
Mex Tel:(+52) 777-362-7770; m23ce146@cenidet.tecnm.mx

Abstract:
Both Parkinson and Essential Tremor are movement disorders that cause tremors in the human body, mostly in the hand with a frequency of 3-12 Hz. It can be found in specialized literature that the dynamic behavior of the affected hand is quite similar to the vibration of mechanical systems; therefore, tremors can be analyzed and treated using the same approaches used for controlling vibrations aimed at reducing or even suppressing them. Several studies showed that the human arm may be represented by biomechanical models of 3-degrees of freedom consisting of an array of mass-spring-damper. Through the literature review, it was found that the proposed mechanical devices for tremor controlling can be classified as a) Passive, b) Active, and c) Functional electrical stimulation, which are mostly in experimental stages with only some of them commercially available.
Keywords: Biomechanical Models, DVA´s, 3 DoF.

1. INTRODUCCIÓN

El Parkinson y el Temblor Esencial son dos de los principales trastornos del movimiento que afectan al ser humano, con una tasa de incidencia de 6.2% para el temblor esencial y 1.9% para la enfermedad del Parkinson (Benito-Leon & Leon-Ruiz, 2020). Ambas enfermedades se caracterizan por un movimiento involuntario que pueden presentarse en las extremidades del cuerpo como lo son: manos, piernas, cabeza, y otros lugares menos comunes como las cuerdas vocales. Este movimiento involuntario se presenta de manera rítmica y en la mayoría de veces se encuentra principalmente en las manos. I. Tudurí Pérez y H. Liaño Martínez (Tudurí Pérez & Liaño Martínez, 2001) define el temblor en el cuerpo humano como un movimiento rítmico oscilatorio e involuntario. Estos movimientos involuntarios pueden surgir por varios motivos: por el uso de fármacos o su abstinencia a ellos, el alcohol, problemas de la tiroides (hipertiroidismo) o problemas neurológicos.

El Parkinson y el Temblor Esencial comparten algunas características, y se caracterizan por sufrir un temblor principalmente en las extremidades superiores del paciente, presentando una frecuencia característica de 3 a 12 Hz (Guadalupe et al., 2022). El Temblor Esencial se manifiesta cuando la persona ejecuta algún movimiento o sujeta un objeto y el Parkinson se presenta cuando la extremidad superior del paciente se encuentra en reposo.

Existen medicamentos para ambas enfermedades que pueden favorecer la disminución del temblor, pero no es posible llegar a eliminarlo por completo. Lo anterior ha generado la necesidad de encontrar nuevas alternativas que sean menos invasivas para el paciente y de igual forma sean capaces de controlar el movimiento involuntario (Buki et al., 2018; Chuanasa & Songschon, 2015; Dueñas et al., 2018; Faizan & Muzammil, 2020a; Loureiro et al., 2005; Maneski et al., 2011).

En este documento se presenta una compilación de las características del Parkinson y el Temblor Esencial, así como los modelos matemáticos del comportamiento dinámico del temblor y su comparación con la vibración en un sistema mecánico, así mismo, se mencionan algunas alternativas que se proponen como prototipos que tienen como propósito atenuar y controlar el temblor ocasionado por estas enfermedades.

2 ENFERMEDAD DE PARKINSON, TEMBLOR ESENCIAL Y MODELADO DEL BRAZO

2.1 Parkinson

La enfermedad de Parkinson (EP) es la segunda enfermedad neurodegenerativa que frecuentemente se presenta en adultos de más de 65 años, esta enfermedad se caracteriza por ser crónica y progresiva y es a causa de la lenta degeneración de las neuronas cerebrales (Tapia-Núñez and Chaná 2004), los síntomas característicos de estas enfermedades, pueden clasificarse en dos grupos: motores y no motores (Simón Pérez et al. 2017). Por parte de las no motores se definen como:

ISSN: 2992-8338

- Neuropsiquiátricos: trastornos del humor, confusión, demencia, psicosis, alucinaciones y delirio.
- Relacionados con el sueño: trastornos en el inicio y mantenimiento del sueño, trastornos de conducta del sueño REM e hipersomnia diurna.
- Autonómicos: disfunción cardiovascular, gastrointestinal, y termorreguladora.
- Sensitivo-sensoriales: hiposmia, ageusia y diferentes variantes del dolor, entumecimiento, hormigueo y sensación de tensión muscular, entre otros.
-Otros: fatiga, diplopía, visión borrosa, seborrea, así como pérdida o ganancia de peso.

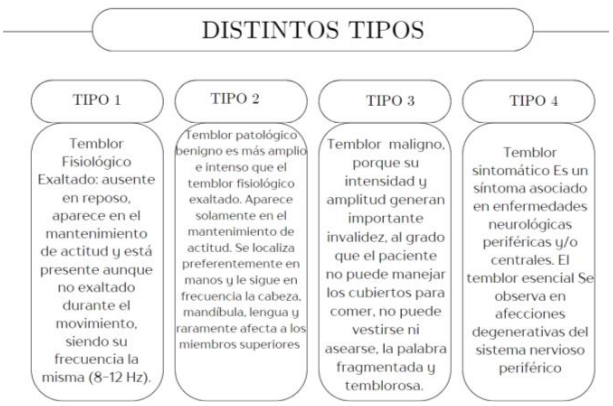
Por otra parte, los síntomas motores que se pueden mencionar son:
-Temblor (3-12 Hz)
-Rigidez: extensión limitada en las extremidades (rango de movilidad reducido)
-Bradicinesia: lentitud en los movimientos de las extremidades.

El temblor es la característica principal por la que se conoce el Parkinson, este movimiento se presenta en las manos y se le conoce como “cuenta monedas” y al ser un temblor de reposo, únicamente aparece cuando la mano no está realizando un movimiento voluntario o sin ejercer una acción (Marín et al., 2018).

2.2 Temblor Esencial

El Temblor Esencial (TE) es conocido por ser un temblor sin causa evidente y es el trastorno de movimiento más frecuente que se presenta en personas de cualquier edad, sin embargo, se reporta que la población más vulnerable son las personas de la tercera edad. Pablo Venegas et al. (Venegas F et al., 2010) define este trastorno como un movimiento rítmico que hace oscilar la extremidad. Él TE se caracteriza por presentarse cuando la extremidad está realizando una acción o sujetando un objeto. C. Chouza (Chouza, 1986) clasifica él TE en 4 tipos distintos según su gravedad, Tabla 1.

Tabla 1. Tipos del Temblor Esencial según su gravedad (Chouza, 1986)



En la Tabla 1 se presentan los síntomas característicos de los 4 diferentes tipos de Temblor: Temblor fisiológico, Temblor patológico, Temblor maligno y Temblor sintomático.

2.3 Similitud entre el Parkinson y Temblor Esencial

Algunos autores resaltan la complejidad de distinguir sí el temblor es ocasionado por la enfermedad del Parkinson o por el Temblor Esencial, ya que ambas enfermedades se caracterizan por presentar un movimiento involuntario en la extremidad superior del paciente con frecuencias similares en el intervalo de 3 y 12 Hz, siendo la población más vulnerable las personas de la tercera edad. En la literatura, se reportan diferentes estudios donde se especifican las características principales de cada enfermedad (Chouza, 1986; Labiano Fontcuberta & Benito León, 2012; Tudurí Pérez & Liaño Martínez, 2001). En la Tabla 2. Comparativa entre el Parkinson y Temblor Esencial (Chouza, 1986).

Tabla 2. Comparativa entre el Parkinson y Temblor Esencial (Chouza, 1986)

	Parkinson	Temblor Esencial
Clínica	Rigidez, Temblor	Temblor
Tipo de temblor	Reposo	Actitud
Temblor en manos	Mas común	Común
Temblor cabeza	Flexión	Rotación
Palabra temblorosa	Poco	Frecuente
Frecuencia de temblor	3-8 Hz	3-8 Hz
Antecedentes familiares	Poco	Frecuente
Progresión	Rápida	Poca o nula
Evolución	Corta	Prolongada
Invalidez	Frecuente	Rara

Es importante observar que las características que son comunes en ambas enfermedades es el temblor en la extremidad superior, así como, la frecuencia, por lo que las alternativas de control que puedan desarrollarse pueden ser útiles y aplicables en ambas enfermedades.

2.4 Modelo biomecánico del brazo

La necesidad de entender el comportamiento dinámico del temblor en la extremidad superior a causa de las enfermedades del Parkinson y él TE, ha llevado a proponer alternativas de control haciendo una similitud del temblor con el fenómeno vibratorio presente en un sistema mecánico. De acuerdo con la literatura se reportan modelos biomecánicos que permiten el uso de elementos mecánicos como masa, rigidez y amortiguamiento que simplifican el comportamiento de músculos y huesos de la extremidad superior facilitando el análisis y comprensión del comportamiento dinámico del movimiento involuntario (Faizan & Muzammil, 2020; Gebai et al., 2018, 2019; Hashemi et al., 2004; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016a), dando oportunidad de proponer el diseño de dispositivos pasivos basados en los absorbedores

ISSN: 2992-8338

dinámicos de vibración DVAs como una alternativa de control (Faizan & Muzammil, 2020).

En la Figura 1 se muestra un esquema del modelo biomecánico de la extremidad superior propuesto por Gebai (Gebai et al., 2019), modelo matemático de 3 grados de libertad que emula el comportamiento dinámico (flexión/extensión) del hombro, codo y palma mediante el vector de desplazamientos angulares θ_1, θ_2 y θ_3 respectivamente. El brazo, antebrazo y palma se modelan como masas concentradas en el centroide de cada uno de los elementos, así mismo, se considera un resorte torsional y un amortiguador para modelar la articulación del hombro, codo y muñeca, elementos mecánicos que simulan el par torsional que ejercen los músculos de forma pasiva.

Durante las últimas dos décadas, para mejorar las estrategias de control pasivo en los diferentes campos de la ingeniería, se han propuesto diferentes tipos de dispositivos mecánicos, eléctricos e hidráulicos. Estos dispositivos son bien conocidos en la literatura como absorbedores de vibración (DVAs) o amortiguadores de masas sintonizadas (TMDs), y han sido aplicados especialmente para mitigar la vibración de sistemas mecánicos (LI et al., 2021; Pani et al., 2017; Rios-Gutierrez & Silva-Navarro, 2013). En la Figura 2 se muestra el esquema del modelo biomecánico propuesto por Faizan & Muzammil (Faizan & Muzammil, 2020), modelo matemático que incluye un absorbedor de vibración (DVA) en el antebrazo, dispositivo que tiene como objetivo el control del temblor de forma pasiva; generado por las enfermedades del Parkinson y TE. Con el modelo propuesto es posible analizar el comportamiento dinámico del brazo, antebrazo y palma.

El modelo matemático de forma generalizada correspondiente a la Figuras 1 y 2, se puede representar mediante la Ecuación (1), donde [M] es la matriz de masas, [C] es la matriz de amortiguamiento y [K] es la matriz de rigidez. δ representa el vector de desplazamiento, así como sus derivadas

$$[M]\ddot{\delta} + [C]\dot{\delta} + [K]\delta = [F] \qquad (1)$$

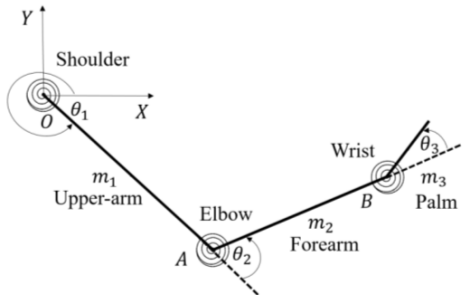


Figura 1. Representación del modelo dinamico del brazo de 3 Gdl(Gebai et al., 2019)

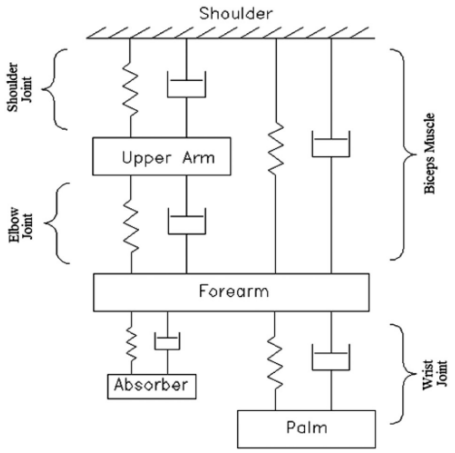


Figura 2. Representación de la extremidad superior como un sistema masa-resorte-amortiguador (Faizan & Muzammil, 2020)

De lo anterior se puede visualizar que existe un campo amplio para el diseño de dispositivos pasivos para el control del temblor generado por las enfermedades de Parkinson y el TE implementando absorbedores dinámicos de vibración (DVAs) basados en redes mecánicas.

3 DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL DEL TEMBLOR

A causa de que los tratamientos médicos han resultado ser muy costosos y poco efectivos en el control del temblor involuntario (medicamentos y cirugías), ha surgido la necesidad de buscar nuevas alternativas de control que pueden ser de tipo pasivo o activos.

3.1 Dispositivos pasivos

Un dispositivo de control pasivo se puede definir como aquel dispositivo que no puede excitar o suministrar energía al sistema vibratorio, en esta línea de investigación se le ha dado especial interés al análisis y estudio del desempeño dinámico de los absorbedores dinámicos de vibración (DVAs). El primer DVA fue propuesto por H. Frahm (H. Frahm, 1911) el cual esta formado por un sistema masa resorte (sistema secundario), conectado en serie con el sistema vibratorio principal. Posteriormente se agregó el elemento amortiguador conectado en paralelo con el resorte, elemento que mejoró el desempeño dinámico del DVA logrando reducir las vibraciones del sistema principal. De los resultados reportados en la literatura acerca de la efectividad de los DVAs para el control de vibraciones en sistemas mecánicos, ha dado como resultado que los DVAs actualmente se están implementando en el diseño de dispositivos de control pasivo para atenuar o controlar el temblor involuntario, abriendo un área de oportunidad de estudio para mejorar la calidad de vida de los pacientes que tienen la enfermedad de Parkinson y el TE.

3.1.2 Estudios numéricos

ISSN: 2992-8338

Como se mencionó en la Sección *2.4 Modelo biomecánico del brazo,* con el objetivo de entender el comportamiento dinámico del movimiento del brazo y poder llegar a un diseño optimizado de un prototipo funcional que cumpla con los requerimientos para la atenuación del temblor involuntario, es necesario realizar un estudio paramétrico para analizar el efecto e influencia de cada una de las variables involucradas en el fenómeno del temblor. En la literatura se reportan diversos estudios numéricos, donde se analiza el desempeño dinámico de los absorbedores de vibración en la supresión del temblor generado por la enfermedad de Parkinson y él TE variando los parámetros de rigidez, masa y amortiguamiento del DVA (Buki et al., 2018; Gebai et al., 2016; Gebai & Hammoud, 2016; Hammoud et al., 2016; Hogsberg, 2021; Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016b, 2016), como resultado de los estudios realizados se reportó una reducción de la amplitud del temblor en un intervalo del 50% al 60%.

3.1.2 Prototipos de DVAs

Ya se mencionó que una alternativa viable para el control de temblor involuntario es el uso de los DVAs, M. Faizan y M. Muzammil (Faizan & Muzammil, 2020) diseñaron un brazalete prototipo basado en un DVA convencional que permite realizar acciones y actividades de forma natural, Figura 3. La configuración del DVA consta de un sistema masa-resorte sumergido en un medio líquido que actúa como elemento amortiguador. M. Faizan y M. Muzammil reportaron una reducción del temblor del 57.25%. Un prototipo similar fue desarrollado por Buki et. al. (Buki et al., 2018), en este prototipo se implementó un DVA clásico sin amortiguamiento. El DVA diseñado atenúa el temblor en un ancho de banda de frecuencia alrededor de la frecuencia natural del DVA propuesto, por lo que fuera de este ancho de banda el temblor se vuelve amplificar, sin embargo, el ancho de banda efectivo se puede mejorar incrementando la inercia del absorbedor. Tomando como referencia las amplitudes más grandes registradas del temblor, los resultados obtenidos mostraron una reducción del temblor hasta un 80%.

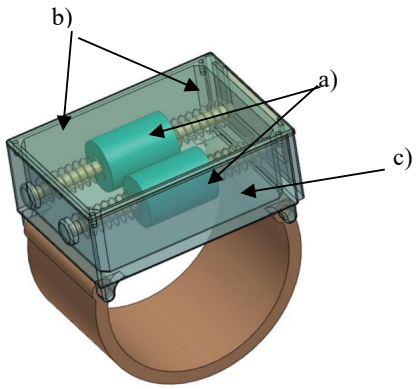


Figura 3 Brazalete prototipo absorbedor de vibraciones (Faizan & Muzammil, 2020)

Elementos mecánicos del DVA propuesto de la Figura 3.

a) masas del DVA.
b) Elemento resorte del DVA.
c) Medio líquido (amortiguamiento)

Aunque estos dispositivos mostraron ser capaces de reducir el temblor, tienen la desventaja que solo son eficientes en un rango de frecuencia limitado, por lo que, si el paciente experimenta diferentes frecuencias en el temblor, estos dispositivos no tienen un buen desempeño dinámico y no cumple el objetivo para el que fue diseñado. Cabe hacer notar, que existe un área de oportunidad de mejorar el desempeño dinámico del DVA implementado redes mecánicas y utilizando técnicas de optimización (Puntos invariantes, H_∞) para el diseño del absorbedor.

3.2 Dispositivos activos

Un dispositivo de control activo se puede definir como el dispositivo que excita y suministra energía con base en una retroalimentación del sistema. Los dispositivos activos funcionan mediante elementos electrónicos, como: servomotores, actuadores, sensores y controladores, donde cada uno de ellos deben ser montados sobre una estructura, por lo que es necesario el uso de una ortesis que además de soportar el peso de los componentes también debe de cumplir con la dinámica de los movimientos propios del brazo, sin llegar a restringir ningún rango de movimiento. En la Figura 4 se muestra el diseño de una órtesis propuesta por Loureiro et al. (Loureiro et al., 2005), ortesis que puede suprimir dinámicamente el temblor patológico, aplicando un amortiguamiento viscoso a la extremidad afectada de manera controlada. El diseño de la ortesis propone un nuevo diseño de actuador basado en fluidos magnetorreológicos que suministra de manera eficiente el amortiguamiento necesario en respuesta a la frecuencia y la amplitud del temblor.

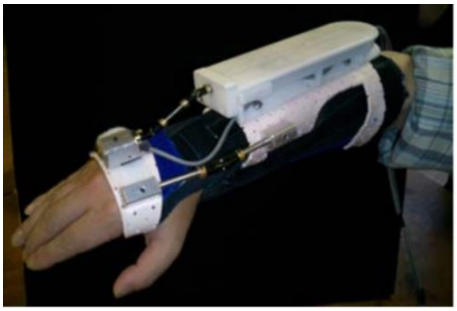


Figura 4 Ortesis prototipo (Loureiro et al., 2005)

Se ha reportado en la literatura que las ortesis permiten reducir al 100% el temblor involuntario (Chuanasa & Songschon, 2015; IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference (31st: 2009: Minneapolis et al., 2009; Jhonatan et al., 2019; Lekshmi & Ramachandran, 2019; Loureiro et al., 2005), donde, esta alternativa presenta una ventaja principal en comparación con los sistemas pasivos, las ortesis al ser un dispositivo activo se sintoniza de manera automática en las diferentes frecuencias del temblor, logrando un ancho de banda de trabajo efectivo mayor que el ancho de banda de trabajo de un dispositivo pasivo, controlando en su totalidad el movimiento involuntario (Figura 5. Respuesta vibratoria del

ISSN: 2992-8338

brazo sometido a diferentes esquemas de control Sin embargo, poseen una desventaja en comparación con los dispositivos pasivos, son caros y pesados a causa de la gran cantidad de componentes que los constituyen, además, su respuesta no es inmediata, ya que, al tener que procesar la información requiere un tiempo para adaptarse a la nueva frecuencia.

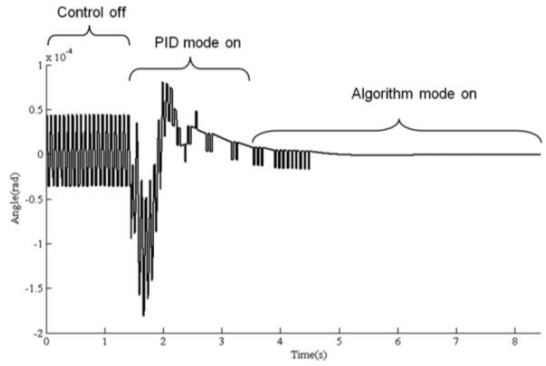


Figura 5. Respuesta vibratoria del brazo sometido a diferentes esquemas de control

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la amplitud del desplazamiento angular del brazo cuando la ortesis no esta en operación, asimismo, se observa la respuesta cuando el control de la ortesis entra en operación, se puede observar el tiempo que requiere la ortesis en adaptarse a la frecuencia de operación, hasta disminuir por completo el desplazamiento angular del brazo.

3.3 Estimulación eléctrica funcional (FES)

Recientemente se ha empleado otra alternativa para el control del temblor y es mediante la técnica de estimulación eléctrica funcional (FES, por sus siglas en ingles). H. Gonzales et al. (R. M. Higuera González, L. A. Bello Cruz, V. H. Ortiz Flores 2021) mencionan que inicialmente esta técnica se utilizó en la recuperación de miembros musculares dañados. La técnica consiste en aplicar estímulos eléctricos monofásicos con una amplitud de corriente de 1mA, logrando contracciones musculares controladas que restauran el movimiento funcional del músculo paralizado. La técnica FES se utiliza de forma general en pacientes con problemas de movilidad, sin embargo, en la última década, se ha utilizado y adaptado para controlar el movimiento involuntario (Dueñas et al., 2018; Maneski et al., 2011; Manuel et al., 2021), la técnica consiste en aplicar estímulos eléctricos en áreas específicas del musculo que contrarresten el movimiento involuntario. Maneski et. al. (Maneski et al., 2011) desarrollaron un algoritmo capaz de adaptarse en tiempo real a la frecuencia del temblor del movimiento involuntario presente en la mano del paciente. De los resultados obtenidos concluyeron que la estimulación es más eficiente cuando los electrodos tipo *multipad* son colocados en un solo músculo, comparada, con la estimulación obtenida, cuando los electrodos *multipad* son colocados sobre múltiples músculos. Esta nueva alternativa logro reducir en un 67% el temblor involuntario.

4 CONCLUSIONES

En este artículo se presentan las principales características que diferencian el temblor generado por la enfermedad de Parkinson y el Temblor Esencial, en ambos casos se puede observar que se presenta como característica común un movimiento involuntario en las extremidades superiores con una frecuencia de 3 a 12 Hz, por lo que el diseño de dispositivos sea del tipo pasivos o activos o el desarrollo de nuevas técnicas enfocados al control y supresión del temblor, pueden ser efectivos para contrarrestar los efectos de ambos tipos de enfermedades.

Del estado del arte revisado, se encontró que los dispositivos propuestos para el control del temblor se pueden clasificar como a) Pasivos, b) Activos, y c) Estimulación eléctrica funcional, los cuales se encuentran en su mayoría en etapas experimentales. Se observó que existe un área de oportunidad en el diseño de dispositivos pasivos basados en DVA´s donde es posible implementar y configurar diferentes redes mecánicas que mejoren el desempeño dinámico del absorbedor de vibración, ampliando el ancho de banda de trabajo efectivo, así como la atenuación y control del movimiento involuntario. Asimismo, se encontró que es necesario aplicar técnicas de optimización (Puntos invariantes, H_∞) para encontrar los parámetros óptimos del absorbedor de vibración que logren suprimir y controlar el movimiento.

5 AGRADECIMIENTOS

David Navarrete Parada con numero de CVU 1317543 agradece al Conahcyt por el apoyo.

6 BIBLIOGRAFIA

Benito-Leon, J., & Leon-Ruiz, M. (2020). Epidemiology of essential tremor. In Revista de Neurologia (Vol. 70, Issue 4, pp. 139–148). Revista de Neurologia. https://doi.org/10.33588/rn.7004.2019316

Buki, E., Katz, R., Zacksenhouse, M., & Schlesinger, I. (2018). Vib-bracelet: a passive absorber for attenuating forearm tremor. Medical and Biological Engineering and Computing, 56(5), 923–930. https://doi.org/10.1007/s11517-017-1742-7

Chouza, C. (1986). El temblor esencial. Revista Médica Del Uruguay, 2(3), 251–258.

Chuanasa, J., & Songschon, S. (2015). Essential tremor suppression by a novel self-balancing device. Prosthetics and Orthotics International, 39(3), 219–225. https://doi.org/10.1177/0309364614525185

Dueñas, L., Ochoa, A. O., Gutiérrez, J. R., Hernández, E. J., Antillón, A. J., & Cañedo, C. E. (2018). Prototipo De Electroestimulador Para Pacientes Con Enfermedad de Parkinson. Memorias Del Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica, 150–153. https://doi.org/10.24254/CNIB.18.21

Faizan, M. S., & Muzammil, M. (2020a). Hand tremor suppression device for patients suffering from Parkinson's disease. Journal of Medical Engineering and Technology, 44(4), 190–197. https://doi.org/10.1080/03091902.2020.1759708

Faizan, M. S., & Muzammil, M. (2020b). Hand tremor suppression device for patients suffering from Parkinson's disease. Journal of Medical Engineering and Technology,

ISSN: 2992-8338

44(4), 190–197. https://doi.org/10.1080/03091902.2020.1759708

Gebai, S., Cumunel, G., Hammoud, M., & Foret, G. (2019). Passive Absorber to Reduce the Upper-Limbs Involuntary Tremor. Congrès Français de Mécanique, 214776754.

Gebai, S., & Hammoud, M. (2016a). Parkinson's Disease Treatment as Seen from a Mechanical Point of View. Advances in Parkinson's Disease, 05(04), 97–106. https://doi.org/10.4236/apd.2016.54012

Gebai, S., & Hammoud, M. (2016b). Reduction of Parkinsonism disorder symptoms using passive dual absorbers. 2016 3rd Middle East Conference on Biomedical Engineering (MECBME), 88–91. https://doi.org/10.1109/MECBME.2016.7745415

Gebai, S., Hammoud, M., Hallal, A., & AL Shaer, A. (2018). Structural control and biomechanical tremor suppression: Comparison between different types of passive absorber. JVC/Journal of Vibration and Control, 24(12), 2576–2590. https://doi.org/10.1177/1077546316689200

Gebai, S., Hammoud, M., Hallal, A., & Khachfe, H. (2016). Tremor reduction at the palm of a parkinson's patient using dynamic vibration absorber. Bioengineering, 3(3). https://doi.org/10.3390/bioengineering3030018

Gebai, S., Hammoud, M., Hallal, A., Shaer, A. AL, & Khachfe, H. (2016). Biomechanical treatment for rest tremor of Parkinson's patient. 2016 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET), 32–36. https://doi.org/10.1109/IMCET.2016.7777422

Guadalupe, D., Méndez, D., Mejía, A. R., & Motivación, R. (2022). Clasificación de señales de acelerometría para distinguir la presencia de Enfermedad de Parkinson y temblor esencial [Proyecto de tesis de maestria].

H. Frahm. (1911). Device for damping vibrations of bodies. (Patent 525,455). United States patent office.

Hammoud, M., Page, |, Gebai, S., & Khachfe, H. (2016). Mechanical Treatment of Elderly Parkinson Patient: Parallel Vs. Series Dual Vibration Absorbers. Quest Journals Journal of Research in Mechanical Engineering, 3(1), 2321–8185. www.questjournals.org

Hashemi, S. M., Golnaraghi, I. M. F., & Patla, A. E. (2004). Tuned vibration absorber for suppression of rest tremor in Parkinson's disease \. In Med. Biol. Eng. Comput (Vol. 42).

Hogsberg, J. (2021). Vibration control by piezoelectric proof-mass absorber with resistive-inductive shunt. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 28(2), 141–153. https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1551587

Jhonatan, J., Luna, C., Angel, D., & Giordano, E. (2019). Diseño de un dispositivo para supresión de temblores de flexión-extensión en la mano [Tesis de grado de ingeniería]. Pontificia universidad católica del Perú.

Labiano Fontcuberta, A., & Benito León, J. (2012). Temblor esencial y enfermedad de Parkinson: ¿existe una asociación? Revista de Neurología, 55(08), 479. https://doi.org/10.33588/rn.5508.2012262

Lekshmi, A., & Ramachandran, K. I. (2019). Parkinson's Tremor Suppression Using Active Vibration Control Method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 577(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012056

LI, H., WU, S., CHEN, Q., & FEI, Q. (2021). Design of dynamic absorbers to control the flexural resonant vibration of structures characterized by multiple natural modes. Journal of Sound and Vibration, 513. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116415

Loureiro, R. C. V., Juan M. Belda-Lois, Lima, E. R., Pons, J. L., Sanchez-Lacuesta, J. J., & Harwin, W. S. (2005). Upper Limb Tremor Suppression in ADL Via an Orthosis Incorporating a Controllable Double Viscous Beam Actuator. 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005., 119–122. https://doi.org/10.1109/ICORR.2005.1501065

Maneski, L. P., Jorgovanović, N., Ilić, V., Došen, S., Keller, T., Popović, M. B., & Popovic, D. B. (2011). Electrical stimulation for the suppression of pathological tremor. Medical and Biological Engineering and Computing, 49(10), 1187–1193. https://doi.org/10.1007/s11517-011-0803-6

Manuel, J., Lois, B., Rocón De Lima, E., Mena Del Horno, S., Laparra Hernández, J., Navarro García, J., Carlos González García, J., Almenara, M. S., José, M., & Broseta, V. (2021). Supresión del temblor por Estimulación Eléctrica Funcional.

Marín, D. S., Carmona, H., Ibarra, M., & Gámez, M. (2018). Enfermedad de Parkinson: fisiopatología, diagnóstico y tratamiento. Revista de La Universidad Industrial de Santander. Salud, 50(1), 79–92. https://doi.org/10.18273/revsal.v50n1-2018008

Pani, S., Senapati, S. K., Patra, K. C., & Nath, P. (2017). Review of an Effective Dynamic Vibration Absorber for a Simply Supported Beam and Parametric Optimization to Reduce Vibration Amplitude. International Journal of Engineering Research and Applications, 07(07), 49–77. https://doi.org/10.9790/9622-0707034977

R. M. Higuera González L. A. Bello Cruz V. H. Ortiz Flores. (2021). Diseño de un sistema inalámbrico de estimulación eléctrica funcional adaptativo [Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica]. https://doi.org/10.24254/CNIB.21.30

Rahimi, F., Almeida, Q. J., Wang, D., & Janabi-Sharifi, F. (2009). Tremor suppression orthoses for parkinsons patients: A frequency range perspective. 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1565–1568. https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5332392

Rios-Gutierrez, M., & Silva-Navarro, G. (2013). Control activo de vibraciones en estructuras tipo edificio usando actuadores piezoeléctricos y retroalimentación positiva de la aceleración. 80, 116–125.

Simón Pérez, E., Aguilera Pacheco, O. R., Núñez Lahera, I., & Colina Avila, E. (2017). Síntomas no motores en pacientes con enfermedad de Parkinson. Hospital Provincial Docente Clinicoquirúrgico "Saturnino Lora Torres", Universidad de Ciencias Médicas, Santiago de Cuba, Cuba., 26, 681–687. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192017000600006&lng=es&nrm=iso

Tapia-Nuñez, J., & Chaná-Cuevas, P. (2004). [Diagnosis of Parkinson's disease]. Revista de Neurologia, 38(1), 61–67. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14730494

Tudurí Pérez, I., & Liaño Martínez, H. (2001). Movimientos involuntarios: actualización diagnóstica y terapéutica. FMC - Formación Médica Continuada En Atención Primaria, 8(8), 511–522. https://doi.org/10.1016/s1134-2072(01)75465-5

Venegas F, P., Gómez R, R., & Sinning O, M. (2010). Temblor esencial: Una revisión crítica. Revista Chilena de Neuro-Psiquiatría, 48(1). https://doi.org/10.4067/S0717-92272010000200008



SOBERANÍA ENERGÉTICA

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

ISSN: 2992-8338

Generación de energía eléctrica mediante corrientes marinas.

P. Suazo-Rodríguez*, V. H. Olivares-Peregrino, L.G. Vela-Valdés*****

* Posgrado del Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (correo: m22ce086@cenidet.tecnm.mx)
** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (correo: victor.op@cenidet.tecnm.mx)
*** Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México (correo: luis.vv@cenidet.tecnm.mx)

Abstract: This work focuses on the modeling and simulation of a marine currents system that harnesses marine currents to generate electricity. Modeling and simulation tools are used to understand and analyze the behavior of the system and each of its components, such as the energy capture device, the transmission system, the conversion and distribution systems, and the control system. The simulation results provide information for the design and implementation of tidal power systems, thus contributing to the development of more efficient and sustainable renewable energy sources.

Keywords: marine currents, MPPT, renewable energy sources, generation electricity.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda energética a futuro necesita respuesta y dicha respuesta deberá satisfacer el consumo de energía impuesto por la población y hacerlo respetando el medio ambiente. En los últimos años, se ha producido un aumento de la conciencia mundial sobre la conservación del medio ambiente, por lo que se ha producido un mayor auge en el mercado de las energías renovables y la tecnología energética con el fin de reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

La ley de transición energética del Gobierno de México (GoM) establece el objetivo de que el 35 % de su generación de electricidad provenga de fuentes de energía limpia para 2024. México está en camino de cumplir este objetivo, generando el 26.7 % de su electricidad a partir de fuentes renovables en 2021. Sin embargo, tendrá que continuar expandiendo su sector renovable ya que se espera que la demanda de electricidad en México crezca un 12.7 % para 2024 [1].

El país disfruta de alrededor de 300 días de luz solar cada año, y cuenta con más de 9,000 km de costa, permitiendo que exista un potencial significativo de crecimiento en diversas formas de energía renovable. Las condiciones oceanográficas presentes en la región marina son propicias para la existencia de intensas corrientes marinas, así como una variedad importante de rangos de marea que podrían ser aprovechables como fuente alterna de energía renovable [2].

Un recurso energético importante de los océanos es la energía cinética contenida en las corrientes marinas. Su origen está ligado a las diferencias de temperatura y de salinidad, a las que se añade la influencia de las mareas, que son debidas a las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol. Los efectos se amplifican cuando la corriente atraviesa zonas estrechas limitadas por masas de terreno, incrementándose la velocidad. El proceso de captación se basa en convertidores de energía cinética similares a las turbinas eólicas, empleando en este caso instalaciones submarinas. El rotor de la turbina va montado en una estructura apoyada en el fondo o suspendida de un flotador [3, 4].

En la planificación de proyectos de generación de energía sostenible se deben considerar aspectos sociales, económicos, técnicos y ambientales a fin de determinar los beneficios e inconvenientes que implique el proyecto.

El problema a tratar en este trabajo se enfoca en la cantidad de energía viable a extraer en un caso de estudio que permita realizar un estudio rápido de viabilidad para evaluar la factibilidad y el potencial de éxito de un proyecto antes de su ejecución.

En relación al problema planteado se evalúa un sistema eléctrico por corrientes marinas mediante simulación con el objetivo de conocer la cantidad de energía eléctrica que se puede producir y esto contribuya en el análisis de viabilidad de la implementación del sistema para un caso de estudio seleccionado.

A continuación, se describen de manera independiente los bloques que componen el sistema eléctrico por corrientes

ISSN: 2992-8338

marinas en estudio. Posteriormente se analizan diversos parámetros del sistema para evaluar su funcionamiento.

2. METODOLOGÍA

2.1 Turbina para corrientes marinas

Para establecer los parámetros de la turbina se toma un diámetro del rotor del dispositivo de 9 metros, una profundidad de emplazamiento de 75 m y una velocidad máxima de corriente marina de 1.5 m/s; con el objetivo de diseñar el sistema garantizando que el mismo pueda manejar el valor máximo de flujo a su entrada sin experimentar fallas ni sobrecargas.

Tabla 1. Parámetros del modelo de la turbina para corrientes marinas.

Densidad del agua de mar	$1\,027\ \mathrm{kg/m^3}$
Diámetro de las palas	$9\ \mathrm{m}$
Coeficientes numéricos $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$	$0.5176, 116, 0.4, 5, 21, 0.0068$
Velocidad máxima	$1.5\ \mathrm{m/s}$
Velocidad angular ω_{r1}	$3.55\ \mathrm{rad/s}$
Velocidad angular ω_{r2}	$0.39\ \mathrm{rad/s}$

Con los datos anteriormente presentados se determinan los valores necesarios para simular el modelo de la turbina mediante las siguientes ecuaciones [5-7]:

$$R = \frac{D}{2} = \frac{9}{2} = 4.5\ m$$

$$\lambda = \frac{\omega_{r_1} R}{v_{cm}} = \frac{3.55 * 4.5}{1.5} = 10.65$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{10.65 + 0.08 * 0} - \frac{0.035}{0^3 + 1}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = 0.05889$$

$$\lambda_i = 16.98$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1\left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right)e^{\left(-\frac{c_5}{\lambda_i}\right)} + c_6\lambda$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.35$$

A partir del coeficiente de rendimiento $C_p(\lambda,\beta)$ y de la densidad del agua de mar ρ, se determina la potencia de la corriente marina, la potencia mecánica que puede extraer la turbina y el par mecánico producido por el eje del rotor.

- La potencia obtenida a partir de la velocidad de corriente marina 1.5 m/s es:

$$P_{cm} = \frac{1}{2}\rho_{aguam}\pi R^2 {v_{cm}}^3$$

$$P_{cm} = \frac{1}{2} * 1\,027 * \pi * 4.5^2 * 1.5^3$$

$$P_{cm} - 110\,252.67\ W - 110.25\ kW$$

- De esta potencia la turbina transforma en potencia mecánica:

$$P_m = C_p P_{cm}$$

$$P_m = 0.35 * 110\,252.67$$

$$P_m = 38\,588.43\ W = 38.58\ kW$$

- El par mecánico producido por el eje del rotor es:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_{r_2}} = \frac{38.58}{0.39} = 98.92\ Nm$$

- 2.2 Conjunto Turbina-Generador

Para el esquema de simulación que se muestra en la **Figura 1** se conecta al rotor de la turbina un generador eléctrico, permitiendo que la potencia mecánica transmitida por el eje de la turbina sea convertida en potencia eléctrica.

El bloque de la máquina sincrónica de imanes permanentes de [8] ofrece varios modelos y a continuación se presentan los parámetros del modelo que se utilizó. Este modelo se seleccionó debido a que su potencia mecánica nominal es cercana a la potencia que entrega la turbina.

Tabla 2. Parámetros del modelo del generador sincrónico de imanes permanentes.

Resistencia de fase del estator (R_s)	$0.05\ \Omega$
Inductancias de la armadura [L_d (H) L_q (H)]	[0.0007552 0.0008348]
Enlace de flujo (λ)	0.192
Pares de polos (p)	4
n_m	$3000\ rpm$
Par mecánico (τ)	$-97.96\ Nm$

ISSN: 2992-8338

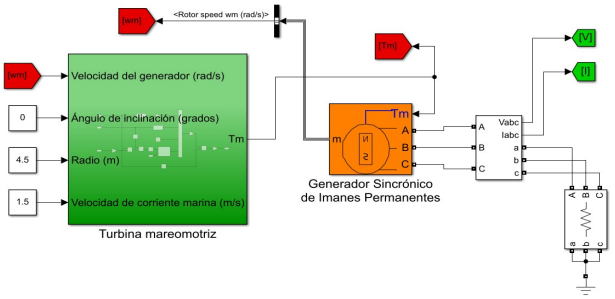


Figura 1. Esquema de simulación Turbina-Generador en Simulink de MATLAB.

2.3 Conjunto Turbina-Generador-Rectificador

En la **Figura 2** se muestra la implementación del rectificador trifásico no controlado de onda completa. Este rectificador está formado exclusivamente por diodos, por lo que no necesita circuitos de mando. Se conecta a la salida del generador, para transformar el voltaje trifásico en un voltaje continuo de salida

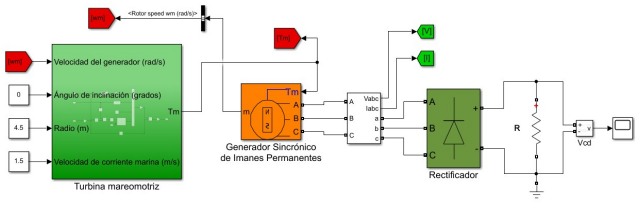


Figura 2. Esquema de simulación Turbina-generador-rectificador.

2.4 Convertidor CD-CD elevador

Posterior a la etapa de rectificación se emplea un convertidor CD-CD elevador (boost converter) con el objetico de elevar el nivel de tensión continua que proporciona el rectificador a otro nivel de tensión continua superior acorde a las necesidades del caso.

Para el diseño del convertidor elevador se toman las propiedades del régimen permanente, donde la corriente en la bobina siempre es positiva y se definen las condiciones de operación de dicho convertidor.

Tabla 3. Parámetros del convertidor CD-CD elevador.

Voltaje de entrada	V_{in}	325 V
Voltaje de salida	V_0	540 V
Potencia de salida	P_0	26 kW
Rizado de voltaje de salida	ΔV_0	1% de V_0
Frecuencia de conmutación	f_s	20 kHz

2.5 Convertidor CD-CA

En la **Figura 3** se presenta el inversor monofásico puente completo implementado con técnica de control de conmutación SPWM bipolar para convertir la corriente directa proveniente del convertidor CD-CD elevador a corriente alterna y posteriormente para cumplir con la norma IEEE 519-2022 se incorpora un filtro LC pasa bajas obteniendo finalmente una señal con bajo contenido de armónicos y alta calidad en su forma de onda, para suministrar energía eléctrica a zona residencial rural.

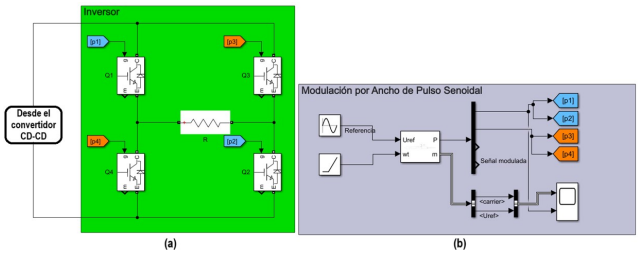


Figura 3. (a) Inversor monofásico puente completo, (b) Esquema SPWM bipolar.

Para generar las señales de control de compuerta de los interruptores del inversor (en este caso IGBTs) se requirieron dos señales; una señal de referencia, que en este caso es una sinusoide y una señal portadora, que es una onda triangular que controla la frecuencia de conmutación [9]. La comparación de estas dos señales genera una señal modulada que contiene los pulsos de control de los interruptores, como se muestra en la **Figura 4**.

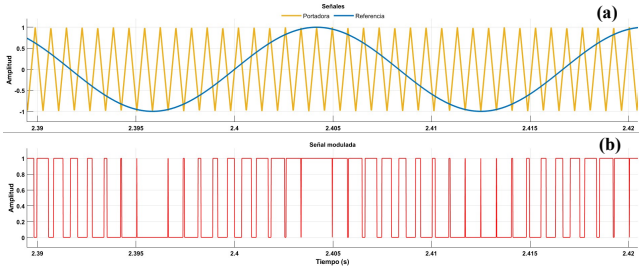


Figura 4. Modulación por ancho de pulso senoidal para un inversor monofásico. (a) Señal de referencia y señal portadora, (b) Señal modulada.

La frecuencia de la señal de referencia es 60 Hz, la cual determina la frecuencia de la señal de salida del inversor, y la frecuencia de la señal portadora se elige de 1,260 Hz, siendo esta última la que establece la frecuencia de conmutación de los interruptores. Esta elección se realiza con el objetivo, inicialmente, de obtener un índice de modulación de frecuencia m_f = 21 dando lugar a que dichas señales estén sincronizadas y no se generen subarmónicos [10] y, por otra parte para que exista un equilibrio entre la eficiencia y la densidad de potencia, debido a que el incremento de la frecuencia de conmutación permite reducir el tamaño de los elementos del circuito, pero afecta la eficiencia del

ISSN: 2992-8338

convertidor al incrementarse las pérdidas por conmutación en los semiconductores de potencia y también aumentan las frecuencias a las que se producen los armónicos.

2.6 Estrategia de control MPPT

La estrategia de control propuesta e implementada es un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) por sus siglas en inglés **M**aximum **P**ower **P**oint **T**racking, como se muestra en la **Figura 5**, para extraer la máxima energía producida por la turbina derivada de la velocidad de la corriente marina. Su funcionamiento consiste en la búsqueda del valor óptimo del ciclo de trabajo D del convertidor CD-CD para extraer la máxima potencia activa referente a la velocidad de corriente marina establecida, provocando que el control opere en o cerca del punto de máxima potencia; para ello se utiliza el algoritmo perturbar y observar comúnmente usado debido a su simplicidad [11-13]. Esta estrategia de control es considerada uno de los controles más importantes para mejorar la eficiencia de los sistemas de conversión de energía por energías renovables, en nuestro caso por corrientes marinas.

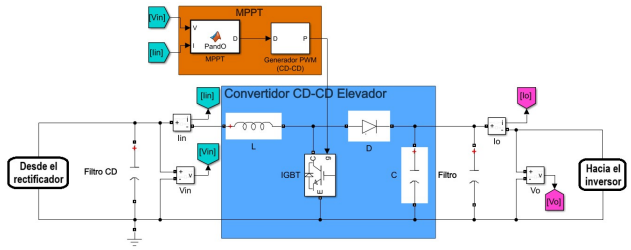


Figura 5. Estrategia de control MPPT implementada en el Convertidor CD-CD.

4. RESULTADOS

Un sistema eléctrico eficiente y seguro requiere una cuidadosa evaluación de diversos parámetros para garantizar su funcionamiento óptimo y confiable. Estos parámetros son fundamentales para mantener la integridad del sistema y proteger tanto a los equipos como a los usuarios.

En primer lugar, se controla la frecuencia de la red para garantizar que se mantenga dentro de los límites aceptables, ya que desviaciones significativas pueden afectar el funcionamiento de los equipos eléctricos.

En términos de calidad de la energía, se evalúan los armónicos para prevenir problemas de distorsión en la forma de onda de voltaje y corriente, y proteger los equipos sensibles de daños.

En cuanto al uso efectivo de la energía se evalúa la eficiencia de cada uno de los bloques que conforman el sistema, para así determinar la energía de salida útil del sistema a partir de la energía de entrada requerida para operarlo.

En la **Figura 6** se muestra el sistema eléctrico por corrientes marinas, con todos los bloques que lo conforman. A partir de los parámetros nominales establecidos se efectúa la operación en estado estable brindando información importante del funcionamiento del sistema.

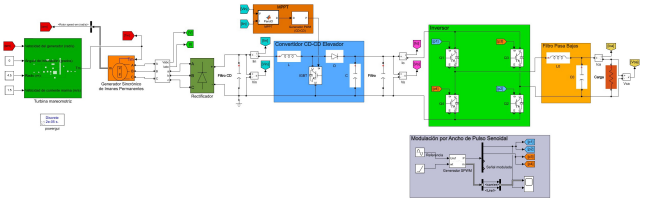


Figura 6. Esquema del sistema eléctrico implementado en Simulink de MATLAB.

La simulación de este sistema se efectúa primeramente teniendo en cuenta que los componentes electrónicos que componen los bloques de electrónica de potencia son ideales, como se muestra en la **Figura 7** a **Figura 9**.

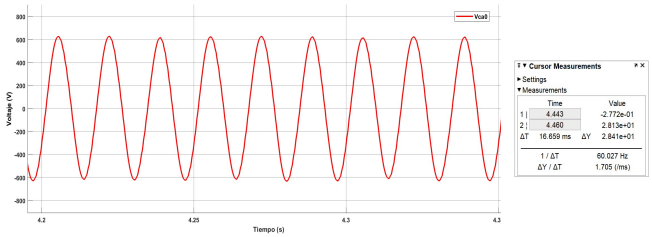


Figura 7. Voltaje a la salida del sistema con componentes ideales.

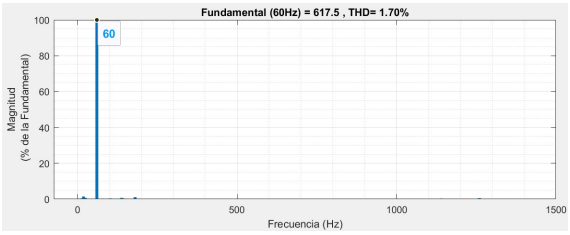


Figura 8. Análisis FFT a la señal de voltaje a la salida del sistema.

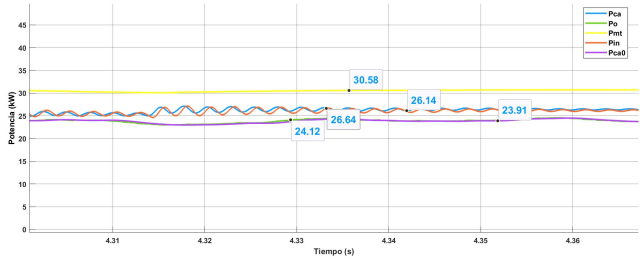


Figura 9. Potencias en distintos puntos del sistema con componentes ideales.

En un segundo momento se simula el mismo sistema, con los valores reales de los componentes seleccionados, obtenidos de las hojas de datos correspondientes.

ISSN: 2992-8338

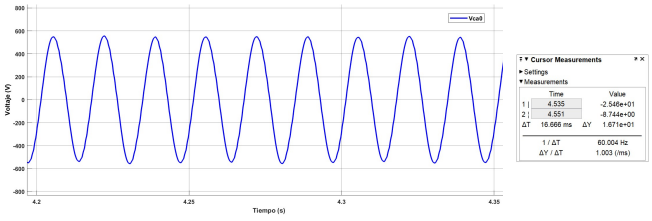


Figura 10. Voltaje a la salida del sistema con componentes reales.

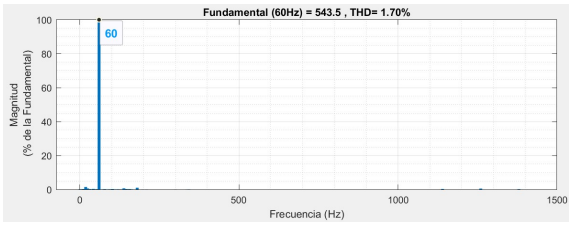


Figura 11. Análisis FFT a la señal de voltaje a la salida del sistema.

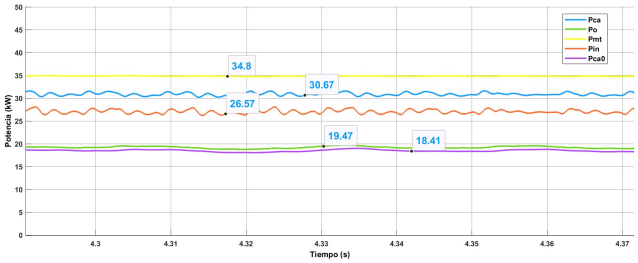


Figura 12. Potencias en distintos puntos del sistema con componentes reales.

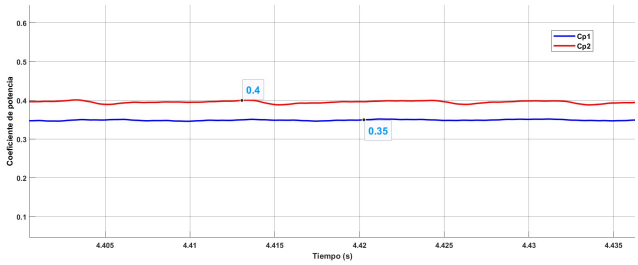


Figura 13. Coeficiente de potencia. C_{p1} – sistema con componentes ideales, C_{p2} – sistema con componentes reales.

Los resultados obtenidos: voltaje monofásico de corriente alterna a la salida del sistema (V_{ca0}), potencia mecánica a la entrada del generador (P_{mt}), potencia activa trifásica a la salida del generador (P_{ca}), potencia activa monofásica a la entrada del convertidor elevador (P_{in}), potencia activa monofásica a la salida del convertidor elevador (P_0), potencia activa monofásica que entrega el sistema (P_{ca0}), potencia total de la corriente marina (P_{cm}) y la potencia mecánica de la turbina (P_m); se resumen en la **Tabla 4** permitiendo que se efectúe una comparación y evaluación del sistema por corrientes marinas.

Tabla 4. Parámetros evaluados en el sistema por corrientes marinas.

	V_{ca0} (V)	Frecuencia (Hz)	THD (%)	P_{cm} (kW)	P_m (kW)
Sistema con componentes ideales	617.50	60	1.70	110.25	38.58
Sistema con componentes reales	543.50	60	1.70	110.25	44.10
	P_{mt} (kW)	P_{ca} (kW)	P_{in} (kW)	P_0 (kW)	P_{ca0} (kW)
Sistema con componentes ideales	30.58	26.64	26.14	24.12	23.91
Sistema con componentes reales	34.80	30.67	26.57	19.47	18.41

A partir de los valores de potencia representados en la **Tabla 4** se determina la eficiencia de los distintos bloques que conforman el sistema eléctrico, exceptuando la turbina pues en su caso se evalúa el rendimiento. Las simulaciones para los dos casos mostrados se efectuaron con el mismo valor de la carga.

Tabla 5. Eficiencia o rendimiento de los bloques del sistema por corrientes marinas.

	Turbina (Cp)	Generador	Convertidor CA-CD	Convertidor CD-CD	Convertidor CD-CA
Sistema con componentes ideales	0.35	0.87	0.98	0.92	0.99
Sistema con componentes reales	0.40	0.88	0.86	0.73	0.94

Cuando el sistema es simulado con componentes ideales el coeficiente de potencia de la turbina es de 0.35, sin embargo, cuando se simula el sistema con valores reales de componentes electrónicos, aumenta el coeficiente de potencia a 0.40, debido a que, al producirse pérdidas de potencia resultante de la conducción y conmutación de los dispositivos electrónicos, el control implementado trata de compensar estas pérdidas demandándole más potencia a la turbina. Este aumento de potencia se ve reflejado en la **Tabla 4** donde para una misma potencia total de la corriente marina de 110.25 kW, se produce un incremento de la potencia mecánica de la turbina de 38.58 kW a 44.10 kW lo que se traduce en un aumento del coeficiente de potencia de la misma.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo abordó el proceso de generación de energía eléctrica a partir de corrientes marinas. Se ha llevado a cabo un análisis, desde la operación de la turbina hasta la entrega de energía eléctrica a una carga, asegurando el

ISSN: 2992-8338

funcionamiento del sistema y comprendiendo cada uno de sus componentes.

En este estudio se examinó de forma simplificada de cada bloque, las variables eléctricas y mecánicas más representativas de cada uno de ellos, como son: voltaje, potencia, coeficiente de rendimiento, eficiencia, velocidad y armónicos. Todo esto bajo las condiciones de operación en el canal de Cozumel, lo que subraya la importancia de comprender las características del entorno marino para la implementación de un sistema de generación a partir de corrientes marinas.

En términos de calidad de la energía el sistema simulado entrega un nivel de voltaje que cumple con los requisitos de frecuencia y distorsión armónica establecidos por las normas NOM-001-SEDE-2012 e IEEE 519-2022 [14]. Por otra parte, en cuanto al uso efectivo de la energía eléctrica los bloques que componen el sistema, presentan diferencias en cuanto a sus eficiencias, es decir, la simulación arroja bloques con valores de eficiencia de 0.86 y 0.94, como es el caso del ratificador y el inversor, y bloques con una baja eficiencia, 0.73, como el convertidor CD-CD elevador.

Se enfatiza el hecho de que los convertidores de electrónica de potencia trabajan en su totalidad con estrategias de conmutación dura (hard switching), siendo esta conmutación más simple pero menos eficiente; existiendo la posibilidad de aplicar estrategias de conmutación suave (soft switching) con las cuales se podría lograr mayores eficiencias, pero requiere de una implementación más compleja y costosa.

REFERENCIAS

[1] M. E. P. LLC. "La panorama de las energías renovables en México." https://mexicoenergyllc.com.mx/es/blogs/mexico-energy-insights/an-overview-of-renewable-energy-in-mexico (accessed 2024).

[2] G. P. Vanegas *et al.*, "El Futuro de las Energías Marinas en México," *Tópicos de Agenda para la Sostenibilidad de Costas y Mares Mexicanos,* p. 255, 2019.

[3] C. V. M. Labriola and C. E. Peralta, "Análisis de sistema de conversores fluido-dinámicos de energía renovable para la Patagonia Austral de Argentina," *Informes Científicos Técnicos-UNPA,* vol. 4, no. 1, pp. 128-143, 2012.

[4] L. Torres Caparrós, "Estudio de las corrientes marinas con la profundidad," pp. 38-64, 2015.

[5] S. E. B. Elghali, R. Balme, K. Le Saux, M. E. H. Benbouzid, J. F. Charpentier, and F. Hauville, "A simulation model for the evaluation of the electrical power potential harnessed by a marine current turbine," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 32, no. 4, pp. 786-797, 2007.

[6] S. Benelghali, M. E. H. Benbouzid, J. F. Charpentier, T. Ahmed-Ali, and I. Munteanu, "Experimental validation of a marine current turbine simulator: Application to a permanent magnet synchronous generator-based system second-order sliding mode control," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 118-126, 2010.

[7] C. A. Ramírez and A. J. Saavedra-Montes, "Parameter calculation of a small wind turbine model cálculo de parámetros del modelo de una turbina eólica (160 w)," in *2012 IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS)*, 2012: IEEE, pp. 1-6.

[8] T. MathWorks, "Simulink de Matlab, Library: Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Machines," ed, 2020.

[9] M. H. Rashid, *Electrónica de Potencia*, 4 ed. Pearson Educación, 2015, p. 684.

[10] F. L. Luo and H. Ye, *Advanced DC/AC Inverters: Applications in Renewable Energy*. CRC Press, 2013.

[11] K.-H. Kim, T. L. Van, D.-C. Lee, S.-H. Song, and E.-H. Kim, "Maximum output power tracking control in variable-speed wind turbine systems considering rotor inertial power," *IEEE transactions on industrial electronics,* vol. 60, no. 8, pp. 3207-3217, 2012.

[12] J. Ahmed and Z. Salam, "An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency," *Applied Energy,* vol. 150, pp. 97-108, 2015.

[13] M. A. A. M. Zainuri, M. A. M. Radzi, A. Che Soh, and N. A. Rahim, "Development of adaptive perturb and observe-fuzzy control maximum power point tracking for photovoltaic boost dc–dc converter," *IET Renewable Power Generation,* vol. 8, no. 2, pp. 183-194, 2014.

[14] "IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014),* pp. 1-31, 2022, doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9848440.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Improving Energy Usage through Intelligent Load Management with the Help of the Grey Wolf Algorithm.

Reynaldo Angel Serrano Cruz, Jorge Hugo Calleja Gjumlich, Rodolfo Amalio Vargas Méndez.

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Int. Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos, México. C.P.62490.

Abstract: The problems caused by peaks in electrical demand are reflected in a decrease in energy quality, as household consumption follows a pattern that depends on the activities of the occupants of the houses. The article focuses on energy efficiency and intelligent management of electrical demand using the "Grey Wolf Optimization" (GWO) algorithm. A comprehensive analysis is described for residences in Mexicali, considering factors such as household size, appliance selection, and electrical consumption behavior. The study shows how the GWO system reduces demand peaks, thus optimizing energy usage. It highlights its ability to delay load activation without compromising user comfort, considering that the case was developed at the simulation level, validating the results with the help of the PYTHON language. The results show efficient management of electrical loads, with significant implications for local energy management.

Keywords: Smart Home, Grey wolf optimization, energy management systems, Dispersion of charges over time, Blackouts.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, como señaló la Agencia Internacional de la Energía los productores enfrentan desafíos monumentales que se derivan de la compleja interacción entre factores climáticos, sociales y culturales (López, 2008).

El sector residencial tiene un fuerte impacto en la demanda de electricidad (expresada en Watts), y su relevancia se acentuó significativamente durante la pandemia global. La rápida adopción del trabajo remoto, *home office*, llevó a un aumento sustancial del tiempo que las personas pasan en sus hogares, generando una presión adicional sobre el suministro de energía.

Para las empresas proveedoras de electricidad, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el caso de México, es rentable que la diferencia entre los valores máximo y promedio de la demanda (expresada en watts) sea lo más reducida posible, ya que esta condición les permite un mejor aprovechamiento de la capacidad instalada.

Se ha observado que la demanda de electricidad en los hogares experimenta fluctuaciones significativas, y que los electrodomésticos y dispositivos electrónicos operan durante múltiples momentos del día y por lapsos muy variables. Se ha observado también que la cantidad y magnitud de las cargas inciden especialmente las condiciones climáticas de la zona en la cual se encuentran los hogares: las regiones de clima caluroso son las más complicadas, debido a la proliferación de aparatos de aire acondicionado. Otros factores que intervienen son el nivel socioeconómico de los habitantes, y la cantidad y edades de éstos.

Bajo esta óptica, la gestión de la demanda, a nivel residencial, emerge como una estrategia viable para operar la infraestructura eléctrica de manera eficiente y superar los desafíos energéticos. En esencia, la gestión de la demanda se basa en distribuir en el tiempo los periodos de activación de los electrodomésticos, procurando que el impacto en el confort de las personas sea lo menor posible.

En este artículo se describe el desarrollo de un sistema de gestión inteligente de cargas orientado a aplicaciones residenciales. La distribución se optimiza por medio del algoritmo de lobo gris (*Gray Wolf Optimization*, GWO), a fin de minimizar la diferencia entre las demandas pico y promedio. Como caso de estudio, se considera una residencia en Mexicali, ciudad que se caracteriza por veranos muy calurosos. Claramente, la operación de un sistema de esta naturaleza requiere de electrodomésticos inteligentes, los cuales puedan activarse y operarse de manera remota.

1.1 Casos extremos de apagones

La gestión deficiente de la demanda eléctrica puede tener resultados catastróficos, como los apagones en amplia escala, eventos críticos que impactan negativamente en la infraestructura y en la sociedad. Analizar los casos extremos permite comprender mejor las causas subyacentes, e identificar respuestas inmediatas y estrategias a largo plazo para mejorar la resiliencia de los sistemas eléctricos, también brinda una mejor perspectiva de como los gestores de energía como es en este caso el sistema GWO, podría llegar a ayudar en la prevención de esto incidentes.

Algunos casos notables son:

Apagón del Noreste de Estados Unidos y Canadá (2003): comenzó en Ohio debido a una combinación de problemas técnicos en líneas de transmisión y errores humanos en el control de la red. La solución a corto plazo fue restablecer el

ISSN: 2992-8338

suministro eléctrico de manera gradual, priorizando la atención a hospitales, servicios de emergencia y otros sectores críticos. La solución a largo plazo consistió en modernizar los sistemas de control y mejorar la coordinación entre empresas eléctricas. Se establecieron estándares más estrictos para la operación y mantenimiento de la red, incluyendo la implementación de tecnologías de monitoreo y control avanzadas. (NERC, 2004)

India (2012): el más grande en la historia de ese país, afectó a más de 600 millones de personas. Lo causó la sobrecarga en el sistema eléctrico durante la temporada de verano, aunada a deficiencias en la infraestructura de transmisión. A corto plazo se implementaron medidas de racionamiento de energía para gestionar la demanda. A largo plazo se mejoró la infraestructura eléctrica (nuevas líneas de transmisión, modernización de subestaciones, etc.). Se incentivó también la generación de energía renovable para diversificar la matriz energética y reducir la carga sobre el sistema. (Yuan-Kang Wu, 2017)

Venezuela (2019): afectó a gran parte de Venezuela y se atribuyó tanto a problemas en la red de transmisión y generación, como a la falta de mantenimiento y actualización de equipos. A corto plazo se desplegaron equipos técnicos para reparar las fallas y restablecer el suministro en las zonas afectadas. A largo plazo se mejoró la infraestructura, incluyendo la inversión en equipos más modernos y confiables, la capacitación del personal técnico y la implementación de mantenimiento preventivo. Se consideró la diversificación de las fuentes de generación, incluyendo energías renovables, para fortalecer la resiliencia del sistema eléctrico. (Yuan-Kang Wu, 2017)

Los casos citados demuestran la importancia de mantener una infraestructura eléctrica robusta y gestionar eficientemente la demanda de energía. Estos eventos se produjeron por la combinación de una demanda excesiva en los sistemas de distribución, infraestructura obsoleta y falta de mantenimiento. Estos ejemplos subrayan la necesidad crítica de invertir tanto en estrategias de gestión de la demanda para garantizar la confiabilidad y estabilidad del suministro eléctrico en todo momento.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Smart homes.

Las casas domóticas, *smart homes*, son un campo emergente en la gestión de la demanda. En el artículo escrito por (Yazdani, 2020) se discute el papel de la domótica en la gestión de la energía en entornos residenciales. Se exploran las tecnologías de sensores inteligentes y sistemas de automatización, y los algoritmos de optimización para mejorar la respuesta ante la demanda eléctrica en hogares.

En (Dong, 2019) se analiza la integración de sistemas de gestión de energía en viviendas inteligentes, y se destacan la importancia de la comunicación entre dispositivos y la capacidad de programación para reducir el consumo energético y adaptarse a patrones de demanda cambiantes.

2.2 Sistemas de Gestión de Energía en el Hogar.

Los Sistemas de Gestión de Energía en el Hogar (*Home Energy Management Systems, HEMS*) permiten supervisar y regular el consumo de energía de manera instantánea mediante sensores y dispositivos inteligentes. Esta capacidad facilita la detección de patrones de consumo y la adaptación automática de dispositivos para maximizar su eficiencia. Entre muchas investigaciones, sobresalen las siguientes:

De acuerdo con la investigación de (Hussain Shareef, 2018), los HEMS emplean algoritmos de optimización que analizan datos históricos y las condiciones actuales para tomar decisiones informadas sobre el consumo de energía, lo que puede reduce el desperdicio energético.

Respecto a la Integración de Energías Renovables, los HEMS permiten incorporar fuentes de energía renovable, como paneles solares y sistemas eólicos, al coordinar la producción y el consumo de energía. (Kotroni, 2020) resalta que los HEMS pueden priorizar el consumo de energía que se genere localmente a partir de fuentes renovables, lo que contribuye a una matriz energética más sostenible.

En cuanto a la Gestión de la Demanda, los HEMS pueden ajustar automáticamente el funcionamiento de dispositivos según la disponibilidad de energía y las necesidades del usuario, evitando picos de demanda y reduciendo la carga en momentos críticos. (Hussain Shareef, 2018) señala que los HEMS permiten programar la operación de dispositivos de alto consumo, como sistemas de climatización, para que funcionen en horarios que evitan sobrecargas en la red eléctrica; se revisa la importancia creciente de los sistemas de gestión energética en los hogares, centrándose en aspectos como la respuesta a la demanda, tecnologías inteligentes y controladores avanzados. También examina cómo los HEMS pueden optimizar el consumo energético de acuerdo con las preferencias de los usuarios, las condiciones de demanda y las tecnologías disponibles. Además, destaca las contribuciones específicas como la evaluación de algoritmos de control, el análisis de eficacia en entornos reales y las perspectivas futuras de investigación, como la integración con energías renovables y la seguridad de datos en sistemas inteligentes.

Por lo que atañe a la optimización, los algoritmos GWO son eficaces en la generación y distribución de energía, mejorando así la eficiencia y calidad del suministro eléctrico. Esto se destaca en el estudio de (He, 2021), que evidencia la utilidad de los algoritmos GWO en la optimización de sistemas energéticos.

Los algoritmos GWO ayudan a optimizar la operación de generadores distribuidos, almacenamiento de energía y cargas en micro-redes, lo que contribuye a la estabilidad del suministro. Esto se demuestra en la investigación de (Su, 2018), que exhibe el éxito de los algoritmos GWO en la optimización de microrredes inteligentes. Aunque los algoritmos GWO no incluyen directamente tecnologías avanzadas, pueden combinarse con otras técnicas para lograr una optimización más completa y adaptativa. Esta integración se menciona en la literatura como una estrategia efectiva para

ISSN: 2992-8338

mejorar la respuesta del sistema eléctrico, según investigaciones como la de (He, 2021).

3. PROPUESTA

En este caso de estudio se propone aplicar el algoritmo GWO para implementar un control de demanda tipo HEMS en un entorno residencial, en una región con temperaturas elevadas. Como premisa de diseño se procura mantener el nivel de confort del usuario, lo que implica minimizar los cambios en los patrones usuales de consumo. Para ello, se analizan los períodos de activación normales de las cargas para entender cómo aprovechar los tiempos de espera (*stand-by*) que ocurren en los regímenes de activación cíclica, como en un refrigerador. Se utilizan datos meteorológicos, estimaciones de consumo de CFE y las características eléctricas de las diferentes cargas. Con estos datos se simulan diversos escenarios de demanda, incluyendo la generación de picos.

En la simulación de perfiles de demanda en Mexicali se consideran factores como el tamaño de los hogares, la selección de electrodomésticos comunes, el nivel económico medio-alto de la población, y el comportamiento típico de consumo eléctrico.

La demanda de potencia en Mexicali sigue un patrón estrechamente vinculado con las temporadas más calurosas del año, como se observa en la Figura 1 que muestra cómo la demanda aumenta progresivamente y alcanza su punto máximo durante los meses de mayor temperatura. Este fenómeno resalta la estrecha relación entre las condiciones climáticas extremas y la necesidad de energía para la refrigeración, especialmente durante el verano.

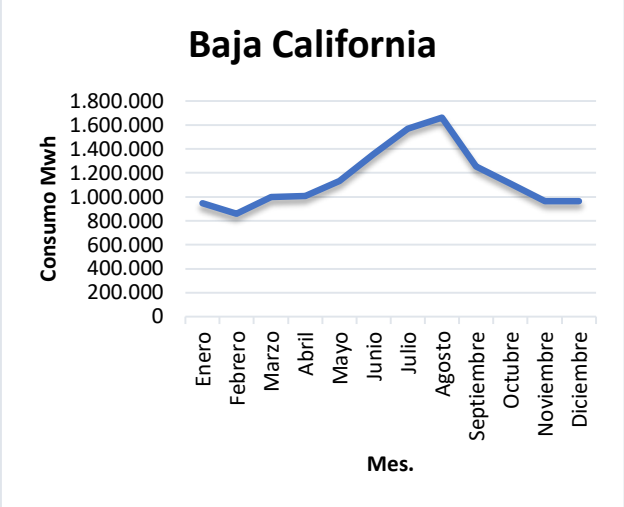


Figura 1 Consumo bruto mensual Mwh 2017. (CONAHCYT, 2017)

En áreas con alta densidad poblacional y actividades industriales intensivas, la demanda eléctrica a menudo supera la oferta disponible. En la figura 2 se puede observar la fluctuación de la demanda a lo largo del día, ocasiona costos adicionales y complejidades operativas significativas, lo que obliga a las empresas a usar generadores de emergencia o adquirir energía de otras regiones.

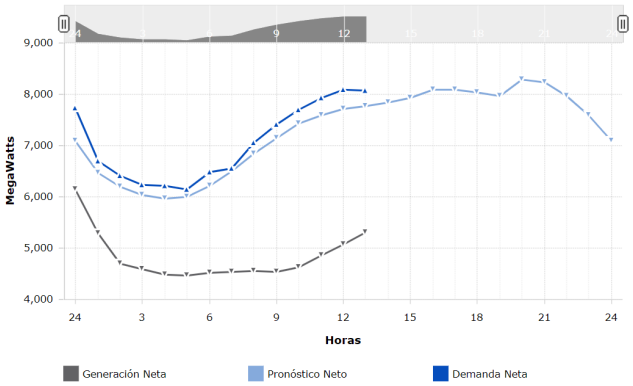


Figura 2 Aumento de la demanda energética "Sistema Interconectado Nacional" (CENACE, 2024)

3.1 Metodología:

La metodología para desarrollar el sistema HEMS es la siguiente:

a. Clasificar las cargas según su comportamiento operativo (desplazable, no desplazable, etc.).
b. Definir un perfil de carga típico para una vivienda que incluya tipos y cantidad de cargas.
c. Establecer el patrón meteorológico asociado a la ubicación geográfica; Mexicali, en este caso.
d. Establecer una secuencia de funcionamiento de las cargas, de acuerdo los hábitos y necesidades de los usuarios (sin optimización inicial).
e. Establecer criterios para evaluar cómo el desplazamiento en el tiempo de las cargas afecta la comodidad.
f. Desarrollar un algoritmo para distribuir en el tiempo las cargas, con el objetivo de reducir la diferencia entre la demanda máxima y la demanda promedio.
g. Verificar el comportamiento del algoritmo según los criterios de desplazamiento.

Las cargas se clasifican en:

- Fijas: esenciales y críticas; su operación no puede posponerse sin impactar negativamente en el confort. Ejemplos incluyen sistemas de calefacción o refrigeración, iluminación esencial, etc.
- Flexibles: Tienen cierta capacidad de ajuste, aunque con restricciones. Es decir: es posible ajustar la hora de conexión dentro de ciertos límites, pero no posponerlas indefinidamente.
- Desplazables: pueden posponerse o reprogramarse sin afectar de manera significativa el confort del usuario. Ejemplos incluyen la carga de baterías o electrodomésticos no esenciales.

En la tabla 1 se listan las cargas que se consideran, y su clasificación.

ISSN: 2992-8338

Tabla 1 Clasificación de las cargas

Carga	Fija	Flexible	Desplazable
MiniSplit	X		
Bomba de agua		X	
Alumbrado		x	X
Plancha		X	x
Refrigerador	x	x	x
Lavadora		x	X
Horno de µ-ondas			
Licuadora		X	
Plancha de cabello			X
Televisión		x	x
Equipo de computo		x	X
Cafetera	x		
Focos		x	X
Ventilador		x	x

En cuanto a la definición de una vivienda tipo y el comportamiento programado de los electrodomésticos, se utilizan patrones de activación estándar que reflejan el uso típico de cada dispositivo: horarios comunes de activación y la duración promedio de funcionamiento de cada electrodoméstico, para simular de manera realista su comportamiento en el análisis la de gestión de cargas.

Para implementar el HEMS, se sigue un enfoque paso a paso que asegura una gestión eficiente y óptima de las cargas eléctricas:

Censo de cargas: Se comienza por identificar las cargas eléctricas presentes en el sistema, sus características eléctricas relevantes (potencia nominal, tiempo de funcionamiento), y su clasificación.

Recopilación de datos: Se utilizan datos meteorológicos, estimaciones de consumo proporcionadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y cualquier otra información relevante para tener un panorama completo de las demandas y patrones de uso de las cargas eléctricas.

Simulación de escenarios de demanda: Con la información recopilada, se simulan diferentes escenarios de demanda, teniendo en cuenta los picos de consumo y las variaciones en el tiempo.

Implementación del algoritmo GWO: Con el algoritmo se optimiza la gestión de cargas eléctricas. Este algoritmo ajusta dinámicamente los objetivos de demanda y ajuste de cargas, calcula la señal de control en función de estos objetivos, y aplica lógica para optimizar el uso de cargas no críticas y el funcionamiento del aire acondicionado según la demanda y el tiempo de encendido.

Se desarrolló una programación específica tanto para el refrigerador como para el aire acondicionado, teniendo en cuenta sus funciones esenciales y patrones de uso habituales.

El refrigerador se programa para funcionar de manera continua a lo largo del día, reflejando su funcionamiento cíclico. Se simula un ciclo de activación con intervalos realistas, considerando la potencia demandada en cada ciclo para calcular su impacto en la demanda eléctrica total.

- Modelo del Refrigerador:

La transferencia de calor en el interior del refrigerador, Q_{in}, puede modelarse utilizando la Ley de Fourier para la conducción del calor o la Ley de Newton para la convección, dependiendo de las condiciones específicas:

$$Q_{in}=UA(T_{ext}-T_{int}) \quad (1)$$

donde U es el coeficiente global de transferencia de calor; A es el área de transferencia de calor; T_{ext} es la temperatura exterior y T_{int} es la temperatura interior.

Por otro lado, el aire acondicionado se programó para activarse en coincidencia con las horas de mayor temperatura y demanda de enfriamiento en relación con el Set-Point previamente establecido. Se simula un ciclo de activación que se ajusta a los patrones comunes de uso, comenzando y terminando en momentos predefinidos

Se tienen en cuenta la temperatura ambiente y sus horarios de aumento y descenso más comunes. Además, se implementa una lógica de control para el aire acondicionado que considera la demanda eléctrica total del sistema y las condiciones ambientales. Esto permite ajustar su activación para evitar picos de demanda excesivos y optimizar su funcionamiento para mantener el confort térmico de manera eficiente. Se establece un umbral de activación y desactivación para controlar el tiempo de funcionamiento y prevenir un consumo excesivo de energía.

Además, se toman en cuenta factores relacionados con los perfiles demográficos y las particularidades de los hogares en la región:

Tamaño y composición de los hogares: Como se observa en la Figura 3, al focalizar la simulación en residencias con dos habitaciones, una sala/comedor y una cocina, un baño por habitación, se logra obtener un perfil de demanda más detallado y representativo de la población objetivo. Esto cobra especial relevancia considerando la tendencia hacia familias más pequeñas y hogares con individuos solteros o sin hijos en Mexicali.

Selección de electrodomésticos y dispositivos: La simulación se centra en electrodomésticos comunes en estos hogares: refrigerador, aire acondicionado, lavadora, secadora, televisor, computadora y sistema de iluminación. Estos dispositivos constituyen una parte importante del consumo energético en los hogares de Mexicali y son cruciales para entender los patrones de demanda energética.

Nivel económico: Se parte de la premisa de que la población tiene un nivel económico medio alto, lo que implica que los

ISSN: 2992-8338

electrodomésticos seleccionados serán relativamente nuevos, de alta calidad y buena eficiencia energética. Además, se espera que estos dispositivos sean programables y compatibles con sistemas de gestión de energía avanzados, facilitando así la implementación del algoritmo de gestión de carga.

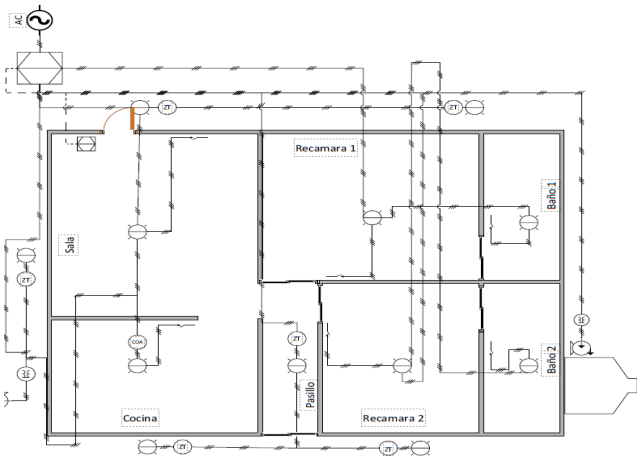


Figura 3 Plano eléctrico de una residencia de 2 recamaras

Comportamiento de consumo eléctrico: Con base en las características demográficas y las especificaciones de los hogares simulados, se puede anticipar un comportamiento específico de consumo eléctrico. Por ejemplo, es probable un uso intensivo de aire acondicionado durante las horas más calurosas del día, así como un consumo significativo de energía en horario nocturno para actividades de entretenimiento y preparación de alimentos.

3.2 Proceso de función del algoritmo GWO:

La implementación cuidadosa y metodológica asegura que el sistema de gestión de cargas eléctricas será capaz de adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes, optimizando el consumo de energía y garantizando el confort del usuario. Las etapas de ejecución de GWO son:

Inicialización de la manada de lobos: está representada por un conjunto de parámetros que definen la programación de los electrodomésticos. Cada lobo tiene una posición inicial aleatoria dentro del espacio de búsqueda, que corresponde a una programación específica de los electrodomésticos.

Evaluación de la aptitud: La "aptitud" de cada lobo se evalúa mediante una función de costo que mide la eficacia de la programación de los electrodomésticos en términos de minimizar la carga acumulada y mantenerla por debajo de un umbral deseado.

Fase de búsqueda y actualización de la posición: Durante esta fase, cada lobo intenta mejorar su posición moviéndose hacia una mejor solución. Esto se logra mediante la actualización de la posición del lobo en función de la posición de otros lobos en la manada y la dirección de la mejor solución encontrada hasta el momento.

Selección de la mejor solución: Después de un número determinado de iteraciones, se selecciona la mejor programación de los electrodomésticos encontrada por la manada de lobos. Esta programación se considera como la mejor para minimizar la carga acumulada y cumplir con el umbral de demanda especificado.

4. RESULTADOS

Se presentan los resultados antes y después de la optimización. Se destacan la reducción de los picos de demanda y la mejora de la gestión de la carga eléctrica, incluye la descripción del sistema energético simulado y los parámetros utilizados, así como una explicación del algoritmo “Lobo Gris” y su aplicación en la optimización de cargas eléctricas.

En la figura 4 se muestra la curva de demanda sin optimización. La simulación muestra que los picos de demanda tienden a acumularse por la tarde, lo que puede llevar a sobrecargas en el sistema. En la figura 5 se ilustra la curva de demanda después de aplicarse la optimización GWO; se observa una reducción significativa en los picos prolongados, los cuales llegaron a un máximo de poco más de 6300 Watts lo que ayuda a evitar sobrecargas y optimizar el uso de energía.

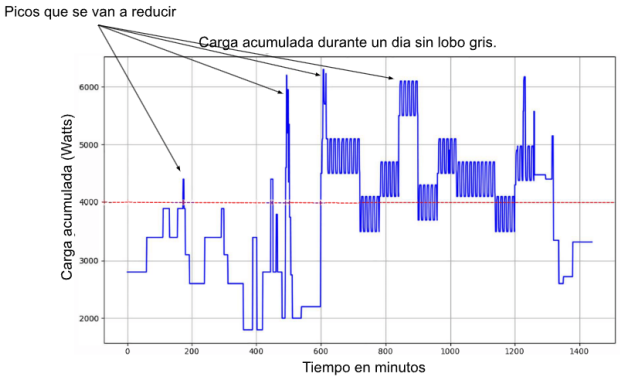


Figura 4 Carga acumulada sin ayuda del sistema GWO

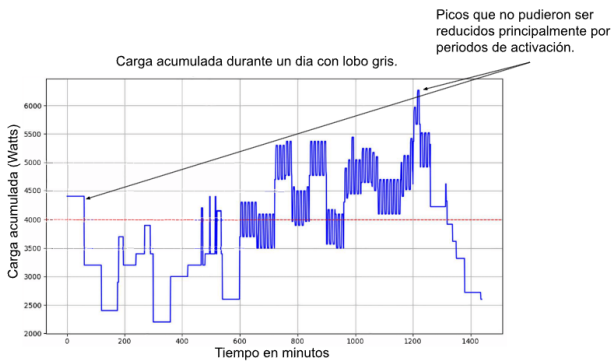


Figura 5 Carga acumulada con la ayuda del sistema GWO

Es importante destacar que el sistema basado en el algoritmo Lobo Gris tiene la capacidad de postergar la activación de cargas para evitar picos simultáneos, aunque reconoce que ciertas cargas críticas no pueden postergarse indefinidamente sin afectar la comodidad del usuario. Además, el sistema cuenta con un rango de protección establecido para evitar sobrecargas, proporcionando así una gestión más segura y eficiente de la demanda de energía en la región de Mexicali.

ISSN: 2992-8338

Los picos que no se redujeron se asocian a la activación de cargas en lapsos en los cuales no se puede apagar de forma automática el aire acondicionado, debido a las condiciones que se establecieron para no afectar el confort del usuario. Una solución factible para estos casos seria que el usuario lo apague de forma manual o cambie sus hábitos de demanda para que estos no generen los picos en estos horarios simulados.

5. CONCLUSIONES

El estudio se centra en evaluar la efectividad del algoritmo GWO para optimizar la distribución de cargas eléctricas en el campo de la gestión inteligente de la demanda de energía en entornos residenciales, especialmente en regiones con altas demandas de refrigeración, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en un contexto de creciente preocupación por la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos energéticos.

Las figuras 4 y 5 ilustran cómo el sistema GWO contribuye a mitigar los picos de demanda generados por las actividades cotidianas del usuario. La capacidad de postergar la activación de las cargas no debe exceder los 5 minutos, ya que períodos más largos podrían afectar las actividades y comodidad del usuario como se menciona en (Gellings, 1981) donde hacen un estudio de como los aires acondicionados pueden swer suspendidos por 8 minutos sin afectar la comodidad del usuario, periodos donde se implementan cargas que no consuman demasiado tiempo. Mediante una serie de numerosas pruebas, se demuestra que es posible gestionar la demanda de potencia de los electrodomésticos con la ayuda de sistemas de gestión HEMS, en particular con el sistema GWO.

Este sistema comprende mediante su identificación del electrodoméstico qué cargas están activas y evalúa si la activación inmediata de una nueva carga representa una amenaza potencial. El sistema ofrece opciones de gestión para cumplir con su objetivo. Se destaca que el factor de incertidumbre para la activación de las cargas fuera de los horarios establecidos dentro de la programación del sistema puede abordarse mediante alertas enviadas al usuario, advirtiéndole sobre posibles sobrecargas anormales. Aunque el sistema está diseñado para no afectar la comodidad del usuario, sin exigir demasiada potencia del sistema de suministro, una de las funciones del HEMS es liberar al usuario de estas preocupaciones, teniendo en cuenta que, bajo determinadas condiciones, la meta de reducir la demanda máxima no es alcanzable.

6. TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del presente caso de estudio abre varias avenidas para futuras investigaciones y mejoras en la gestión de la demanda eléctrica residencial. Algunas de las posibles soluciones y áreas de investigación incluyen: Optimización avanzada con inteligencia artificial, redes neuronales y *deep learning*, integración de fuentes de energía renovable, optimización multicriterio.

REFERENCIAS

CENACE. (21 de 03 de 2024). *CENACE*. Obtenido de https://www.cenace.gob.mx/graficademanda.aspx

CONAHCYT. (2017). *Plataforma Nacional de Energía, Ambiente y Sociedad.* Obtenido de Demanda: https://energia.conacyt.mx/planeas/electricidad/demanda

Dong, J. T. (2019). Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies. *Energy and Buildings*, 318-330.

Gellings, C. W. (1981). Power/energy: Demand-side load management: The rising cost of peak-demand power means that utilities must encourage customers to manage power usage. *IEEE Spectrum*, 49-52.

He, J. W. (2021). A Review on Optimization Strategies of Generation and Load Management in Smart Grid. *Energies*, 2775.

Hussain Shareef, M. S. (2018). Review on Home Energy Management System. *IEEE*, 24498-24509.

Kotroni, A. e. (2020). Smart Home Energy Management Systems: Concept, Configurations, and Future Directions. *Energies*, 5485.

López, C. (2008). *"Retos actuales de la energía", en Fronteras del conocimiento, Madrid, BBVA*. Obtenido de https://www.bbvaopenmind.com/articulos/retos-actuales-de-la-energia/

NERC. (13 de Julio de 2004). *WWW.nerc.com*. Obtenido de chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpncpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.nerc.com%2Fpa%2Frrm%2Fea%2FAugust%252014%25202003%2520Blackout%2520Investigation%2520DL%2FNERC_Final_Blackout_Report_07_13_04.pdf

Su, H. W. (2018). Optimal Scheduling of Smart Microgrid Using Hybrid Optimization Algorithm. *IEEE*, 2302-2312.

Yazdani, A. K. (2020). Impact of Smart Home Energy Management Systems on Energy Efficiency: A Review and Future Directions. *IEEE Transactions on Smart Grids*, 1732-1741.

Yuan-Kang Wu, S. M.-L. (2017). Literature Review of Power System Blackouts. *Energy Procedia*, 428-431.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Application of an electronic differential for the rotation control of an electric wheelchair ⋆

Mauricio Torres González * **Cesar Augusto Arriaga Arriaga** *
Luz del Carmen Gómez Pavón * **Felix Quirino Morales** **
Ramón Parada Alfonso ***

* *Maestría en Ingeniería Electrónica, Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. 18 Sur Edif. FCE1, San Manuel, Puebla, Puebla. C.P. 72570. (email: mauricio.torresg@alumno.buap.mx*
** *Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. 18 Sur Edif. FCE1, San Manuel, Puebla, Puebla. C.P. 72570.*
*** *Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, Edificio Z, Planta Baja, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Gustavo A. Madero, CDMX, C.P. 07738.*

Abstract: Electronic differentials are tools that support the new generation of vehicles, mainly vehicles powered by electric motors, largely replacing the mechanical components of traditional combustion engines, including mechanical transmission and gear differential. However, the electronic differential is a tool that requires very precise control due to the difference in speed between one wheel and another, for this you must consider the characteristics of the motors, Besides that other auxiliary elements facilitate the task of making a turn, that is why in this document an alternative is proposed with which an electric wheelchair can perform the task of turning by supporting an electronic differential.

Keywords: Electronic differential, Motor, Electric wheelchair, Electric vehicles, Mobility.

1. INTRODUCTION

The constant demand for a mobility solution has increased the vehicle fleet in recent years, and these internal combustion vehicles have increased the emission of gases harmful to the environment significantly Tong Jiang (2022), as a result, alternatives have had to be developed to solve this mobility problem, including electric cars, which provide a new generation of mechanical components and systems Pigshu Ge (2021), including the electronic differential.
The electronic differential was developed as an alternative to the traditional system C. Lee (2015), the mechanical differential, which has become somewhat obsolete due to the rise of electric cars since they require much less maintenance than traditional systems Merve Tildirim (2016).
With the technology of the electric motors that drive the new vehicles, the control of these allows a wide variety of configurations so that the vehicle can make turns in a more controlled and safe way for the user, the easiest way to do it in vehicles is the activation and deactivation of engines, so that this does not happen is added the electronic address, whose operation is based on the geometry of Ackermann Draou (2013).

⋆ Gracias a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo brindado para la realización de este documento.

That is why the purpose of this work is to know the application of an electronic differential in an electric wheelchair, which is driven by two electric motors, which, in addition to the criterion of the activation and deactivation of the main engines to turn, a system with an auxiliary motor shall be applied which shall serve as an auxiliary tool for an electronic differential to optimize the rotation of the structure.

2. METHODOLOGY

Electric vehicles date back to 1918, however, they ceased to be popular due to the rise of internal combustion engines, Chang (1993), and the technology was discontinued due to the lack of components to ensure engine power, due to this and the advance of technology have become an alternative to reduce polluting gases and take the step towards a new generation of large-scale mobility, however, there are personal mobility vehicles that also use this type of technology, among them electric wheelchairs. Electric wheelchairs like electric vehicles date back to the early 1900s, España (2020) and their technology has evolved over time, in such a way that the size of the motors has also been reduced and therefore the need to provide better control for the traction of the device and its mode of rotation, is that alternatives are provided, such as the activation and deactivation of an engine for rotation, or also the inclusion of auxiliary systems such as the

ISSN: 2992-8338

electronic differential whose behavior is based on the Ackermann principle.

2.1 Ackermann Steering Principle

The Ackerman Steering principle states that when a vehicle turns on a curve, the axles of all wheels must converge at one point, the instantaneous center of rotation. This is shown in the figure 1. The inner wheel sleeve should rotate at a greater angle than that of the outer wheel, and then a divergence of the front wheels is required when cornering to avoid wear of the tires and prevent slipping. With the aforementioned mechanism, an optimal geometry for the direction is achieved, AUTOMOTRIZ (2019).

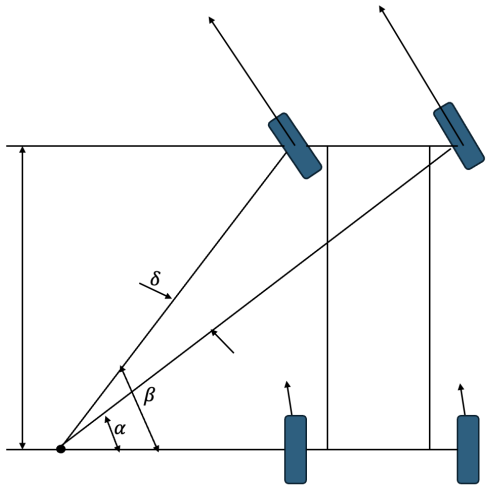


Fig. 1. Representation of the Ackermann Steering Principle

Ackerman condition for rear wheel steering is expressed as, Manjeet Kuthe (2019):

$$cot\delta o - cot\delta t = \frac{B}{L} \tag{1}$$

Where:
$\delta 0$ = outer wheel angle
δt = inner wheel angle
B = distance between the left and right kingpin centerline
L = wheelbase of the vehicle

This principle of rotation is the proper geometry to be followed by low-speed vehicles, such as wheelchairs or cars.

3. DESCRIPTION OF THE SYSTEM

The control system of a wheelchair might seem like a simple control at a glance, however, depending on the components to use, the task becomes more complex because it is necessary to adapt the operation of the same and they are coupled in such a way that they respond to the actions of the user, for this purpose in this case, it is proposed to control two 24 V motors, which are already coupled to their power system, the control of the PWM must be adjusted so that it can perform the twists of the structure in a smooth manner that does not compromise the integrity of the user, in addition to the integration of a rack-pinion system assisted by an additional engine independent of the main engines, it is, therefore, necessary to be clear what the input system will be.

3.1 Flow diagram of the system

The input of the system is proposed as a joystick, for the convenience of the user, because it does not have to make an additional effort to press any button, in addition to being an analog device, provides a more precise control range, since, by characterizing it, a minimum and maximum value of the movement can be determined and a smoother acceleration or rotation response programmed without putting the user at risk by sudden movements.
The acquired joystick signal will pass to the analog port of an ESP32 chip development card, whose information processing system is more capable than a development card like an Arduino UNO, in addition to providing a dual core that allows simultaneous tasks, for this case, in addition to processing the joystick command, generates the control signal for the motor driver, depending on the direction that has been indicated.
Now in figure 2, it is observed that according to the direction that is selected in the joystick, the system will respond accordingly if the forward direction is selected, the system will gently activate the start of both motors, allowing the system to move in that direction, and will brake once the user stops moving the joystick, likewise, if the joystick is selected backward, the motors shall be activated backward in the same way with a smooth start and braking until the user stops moving the joystick in that direction.
In the case of the clockwise direction of rotation, the right engine will reduce its speed, while the left engine will increase it concerning the right engine, generating a differential between both wheels, In addition, the rotation will be assisted by the rack sprocket system that is coupled to the front wheels whose auxiliary motor will rotate clockwise, moving the wheels so that the rotation can be made in that direction more easily.
In the case of the left turn direction, the operation will be similar to the previous case, changing the rotation of the engines, this time the left engine will be slower than the right engine, which will rotate faster, generating in the same way a differential which will be helped by the rack-pinion system, with the auxiliary motor rotating this time in the counterclockwise direction, generating a faster turn, therefore the sensitivity of the joystick shall be adjusted in such a way that the user has better control of the direction of turn and that there are no accidents.

ISSN: 2992-8338

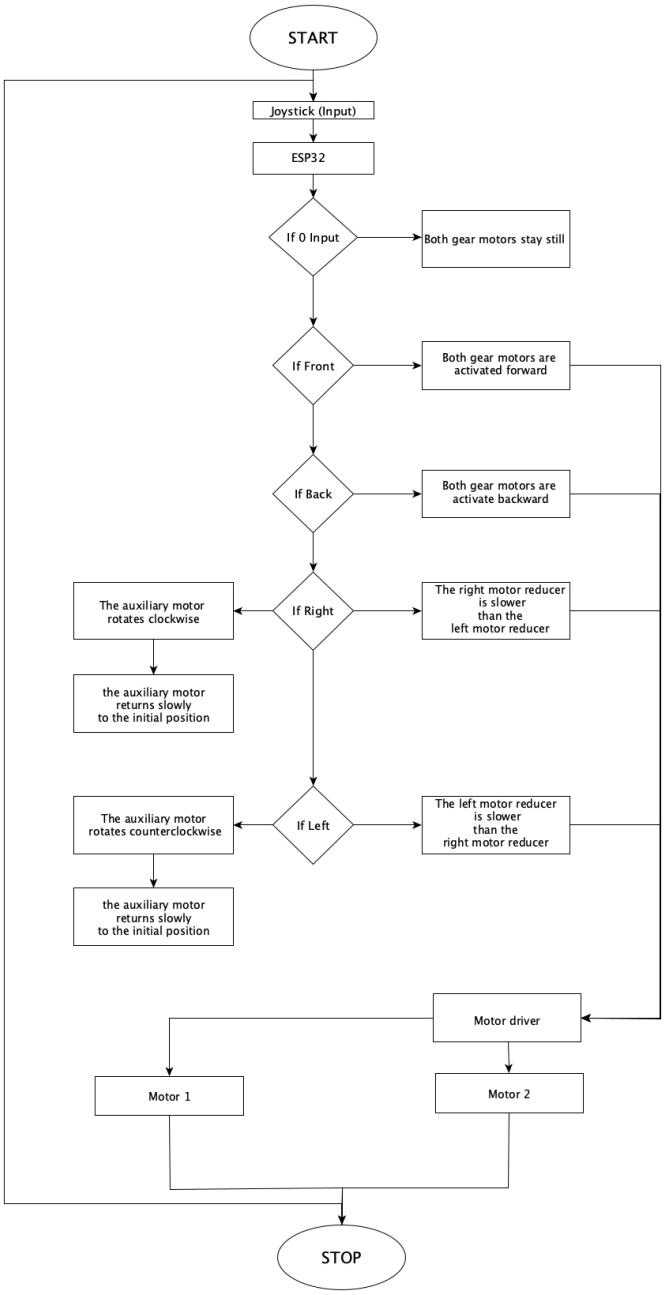


Fig. 2. Flowchart of the turning system

3.2 Application of flow diagram to power train of electric wheelchair

This control method will be applied in an electric wheelchair, in figure 3 shows the CAD model of the power train of the system, which is composed of its traction, the use of two gear motors of 24 V and 30 A, which are powered by a system of two batteries of 12 V and 40 Ah, in addition to the observation of a 12 V auxiliary motor in the rack pinion system, which will serve as the electronic differential to better adjust the rotation, as described above.

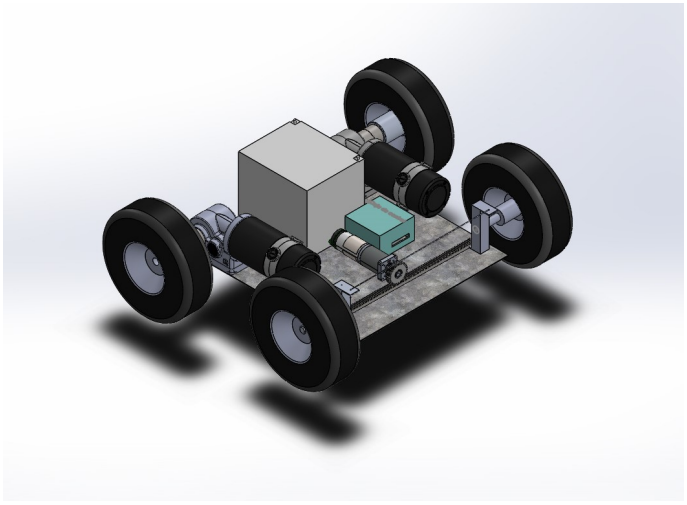


Fig. 3. CAD of the proposed system

In Figure 4 we see in subsection a) the rotation of the system to the left, in subsection b), we observe the rotation to the right of the system, both turns driven mainly by the electronic differential system.

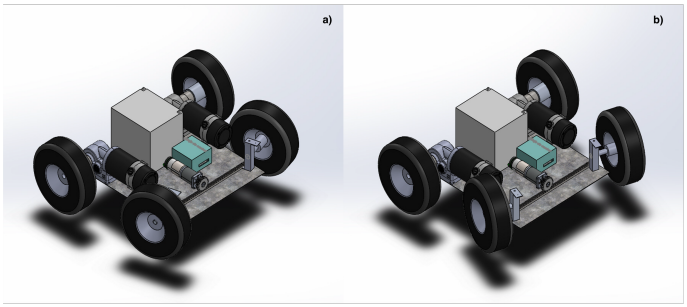


Fig. 4. a) System with left turn direction b) System with right turn direction

The system integrated to what will be the operation in an electric wheelchair as proposed is shown in the following diagram of blocks observed in Figure 5, which integrates an input signal generated by the joystick, according to the selected direction, sends a signal to the microcontroller that in addition to controlling a SEPIC converter which keeps the battery voltage constant at the output, controls the power supplied to the motors by controlling PWM of an H Bridge, the engines already installed on the part of the powertrain are activated or deactivated according to the selected direction and allow the movement of the mechanical structure.

ISSN: 2992-8338

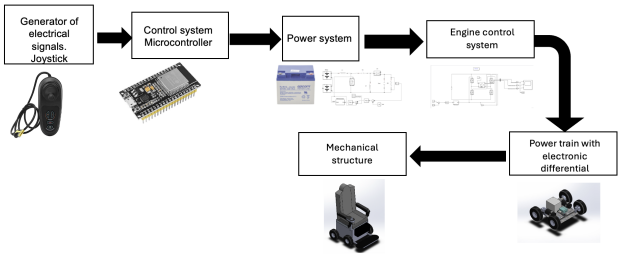


Fig. 5. Diagram of blocks of the system

Therefore, how the system would rotate is observed in Figure 6, in which the rotation of the system is to the right, the auxiliary engine M3 rotates clockwise, moving the front wheels at a certain angle, which is expressed as α as the angle farthest from the center of rotation and which according to the Ackermann principle is less than the β angle, In addition, the M1 motor rotates forward at a higher speed, helping the M2 motor to rotate in the opposite direction to the M1 engine at a lower speed.

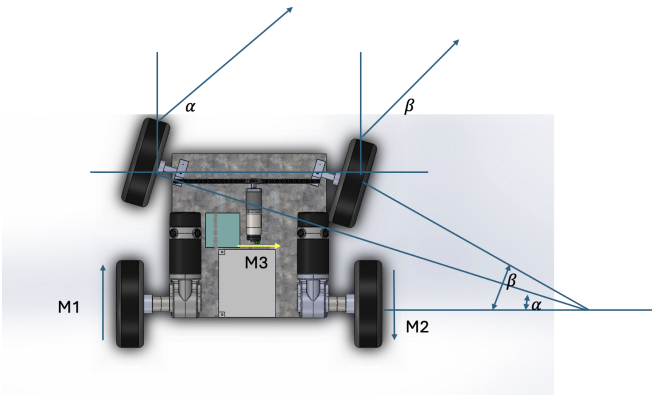


Fig. 6. Kinematic model of the right-turn system

For the left turn the principle is very similar to the previous one in Figure 7, the auxiliary engine M3 rotates counterclockwise, moving the front wheels at a certain angle, which is expressed as α as the angle farthest from the center of rotation and which according to the Ackermann principle is less than the β angle, In addition, the M2 engine rotates forward at a higher speed helping the rotation and the M1 engine rotates in the opposite direction to the M2 engine at a lower speed.

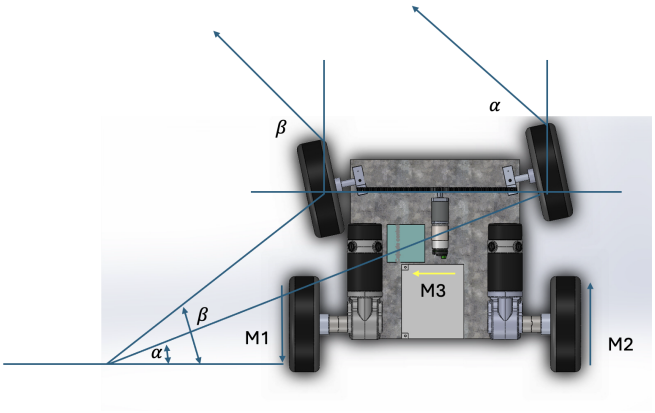


Fig. 7. Kinematic model of the left-turn system

Also, this system and its electronic components must be manufactured to measure due to the current and voltage values of the motors, laying the foundation for future developments in the control and power area.

4. CONCLUSION

The system is being worked on to be properly and efficiently applied, the flow diagram algorithm shall be applied in the programming of the control signals and the interpretation of the joystick movement, allowing the user to have a movement assisted by both the main motors as a traction medium and by the electronic differential to be an auxiliary in the turns of the structure, leaving the guidelines for its application in other types of electric vehicles either for personal use such as scooters or for larger vehicles such as a car or a passenger or cargo truck, further research will continue on more efficient options to replace the rack-pinion system of the powertrain and the feasibility of a system powered by four equal engines to improve traction and complete integration of a differential system electronic without mechanical parts.

REFERENCES

AUTOMOTRIZ, N.Y.M. (2019). Qué es y como funciona el principio de ackerman? URL `https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/que-es-y-como-funciona-el-principio-de-ackerman/`.

C. Lee, K. Chau, C.L. (2015). A new magnetic steering axial-field machine for electronic differential system in electric vehicle. *2015 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*.

Chang, C. (1993). An overview of electric vehicle technology. *Proceedings of the IEEE*.

Draou, A. (2013). Electronic differential speed control for two in-wheels motors drive vehicle. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*.

España, K. (2020). Historia de las sillas de ruedas. URL `https://www.karmamobility.es/2020/04/historia-de-la-silla-de-ruedas/`.

Manjeet Kuthe, Prof. Vrinda Parkhi, A.G.P.C.S.T.K.R. (2019). Scale down model of electrical vehicle using elec-

ISSN: 2992-8338

tronic differential. *2019 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Green Technology (ICISGT)*.

Merve Tildirim, Eyyüp Öksüztepe, B.T.H.K. (2016). Design of electronic differential system for an electric vehicle with in-wheel motor. *2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*.

Pigshu Ge, Lie Guo, J.C. (2021). Electronic differential control distributed electric vehicles based on optimum ackermann steering model. *Proceedings of the 2021 5th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*.

Tong Jiang, Hongyu Zheng, C.Z.C.K.C.K. (2022). Research on electronic differential control algorithm of distributed drive electric vehicles. *Proceedings of the 2022 6th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*.

ISSN: 2992-8338

Evaluación de la entropía de software generada por Código Dispensable en JAVA

Octavio Tonatiuh Flores Millán*. René Santaolaya Salgado*.
Blanca Dina Valenzuela Robles*. Humberto Hernández García*.

**Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, C.P. 62490, México.*
(e-mail: { m22ce049, rene.ss, blanca.vr, humberto.hg }@cenidet.tecnm.mx).

Abstarct: This article presents an approach to measuring the entropy of software generated by poorly formed code that is dispensable in Java applications, aiming to reduce it to improve its maintainability. An automatic tool was developed that uses static analysis to identify and evaluate redundant or unnecessary code fragments. The test results demonstrate that this approach can significantly reduce code complexity as well as improve software readability and performance.

Keywords: *Refactoring, Java, Dispensable Code, Software Entropy, Software Maintenance, Static Analysis.*

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de "Entropía" se aplica en una amplia gama de disciplinas como la física, química, matemáticas, astrofísica, lingüística, computación y ecología; donde se utiliza para describir la tendencia hacia el desorden en los sistemas. En teorías de la información, la entropía se define como el grado de incertidumbre asociada con un conjunto de datos (Significados, 2010), lo que refleja la falta de predictibilidad y el potencial de información contenida en un mensaje.

En el contexto de sistemas informáticos, la transmisión de información no resulta en la pérdida de la misma por parte del emisor, a diferencia de lo que ocurre con la transferencia de energía, como el calor. Esto convierte la información en una corriente de neguentropía (entropía negativa) crucial para los sistemas complejos. En los sistemas abiertos, cualquier incremento constante de entropía se ve contrarrestado por la importación de entropía negativa. Esto se logra a través de flujos de información, energía, cambios de objetivos o estructuras, que permiten reducir la entropía del sistema. A pesar de que estos flujos pueden generar perturbaciones e inestabilidades, la adecuada asimilación de los mismos permite que el sistema continúe funcionando eficientemente. (Lara, 2004)

(Ivar Jacobson, 1992), explora cómo la entropía del software puede ser considerada como una medida del desorden interno del software, que refleja la complejidad inherente a su mantenimiento. Jacobson señala que, según la segunda ley de la termodinámica, el desorden en un sistema cerrado no puede reducirse y solo puede mantenerse igual o aumentar. Esta ley se aplica también a los sistemas de software, donde cualquier modificación tiende a incrementar su desorden o entropía, fenómeno conocido como "entropía del software". Este incremento en la entropía complica las tareas de mantenimiento y evolución del software.

Las presiones de tiempo en el desarrollo de software a menudo resultan en la creación de sistemas que son prácticamente inmanejables, difíciles de entender y sostener a largo plazo. Estos sistemas acarrean lo que se conoce como deuda técnica, un término que refiere a los compromisos de calidad postergados por necesidades inmediatas, pero que a largo plazo resultan en mayor desorden y complejidad. La acumulación de entropía en estos proyectos, frecuentemente es el resultado de la falta de habilidad técnica, el uso de malas prácticas, la experiencia insuficiente o la persistencia en métodos artesanales de desarrollo. Para mitigar estos problemas, es fundamental inyectar neguentropía en los sistemas, lo que puede incluir reestructuraciones o refactorizaciones profundas, y el uso de nuevas tecnologías para reducir la complejidad y facilitar el mantenimiento y reuso del software. (Software Guru, 2019)

Existe una lista de causas que generan entropía y que se proponen para ser resueltos en diversos lenguajes de programación. Por ejemplo, sistemas con exceso de acoplamiento, sistemas frágiles debido a dificultades de encapsulamiento y aislamiento, sistemas carentes de flexibilidad que dificultan cambios de comportamiento para reuso, sistemas con clases o módulos con exceso de responsabilidades, sistemas con condicionales cortas y condicionales largas con profundo nivel de anidamiento, etc. Una anomalía en particular se presenta cuando el código contiene atributos, variables de referencia y métodos, que fueron declarados en el código del sistema, pero que no

ISSN: 2992-8338

participan para alcanzar la meta de valor del sistema al que pertenecen, así como de clases de objetos y métodos nulos, es decir que no tienen comportamiento alguno. Los sistemas legados que presentan estas anomalías, inútilmente están ocupando espacios de memoria, y aumentan las líneas de código, lo que repercute en su legibilidad y dificultan su mantenimiento. Así mismo, cuando métodos o clases de objetos carecen de comportamiento, no garantizan la respuesta de salida que sus clientes esperan de éstos, violentando el principio de sustitución por no cumplir con los contratos subyacentes. Para cumplir el principio de Sustitución de Bárbara Liskov, y por tanto el principio abierto/cerrado, todas las clases derivadas deben cumplir el comportamiento que esperan los clientes de sus clases bases (Liskov, 1988).

2. TRABAJOS RELACIONADOS

I. How changes affect software entropy: an empirical study (Gerardo Canfora, et al., 2012), Este trabajo habla sobre evaluación empírica de cómo los cambios en los sistemas de software afectan la entropía del código fuente. La entropía del software, un concepto derivado de la entropía de (Shannon, 1948), mide la complejidad y la desorganización del código, lo que está estrechamente relacionado con la facilidad de mantenimiento y la propensión a errores del sistema. El estudio se enfoca en cuatro factores principales que pueden influir en la entropía de cambio del código fuente: 1.- Actividades de Refactorización: Se encontró que la entropía por cambios tiende a disminuir después de las actividades de refactorización. Esto sugiere que la refactorización es una práctica efectiva para reducir la complejidad y desorganización del código, facilitando su mantenimiento futuro. 2.- Número de Desarrolladores: Los archivos modificados por un mayor número de desarrolladores tienden a tener una mayor entropía de cambio. Esto puede deberse a que múltiples desarrolladores pueden introducir cambios que no siempre son coherentes, aumentando la complejidad del código. 3.- Participación de Patrones de Diseño: Las clases que participan en ciertos patrones de diseño presentan una mayor entropía por cambios que aquellas que no lo hacen. Sin embargo, esto depende del tipo de patrón de diseño y su contexto dentro del sistema. 4.- Tipos de Cambios: Los diferentes tipos de cambios en el sistema muestran diferentes niveles de entropía de cambio. Por ejemplo, las correcciones de errores suelen tener una baja entropía por cambios, mientras que la introducción de nuevas características tiende a aumentar significativamente la entropía por cambios. El análisis se realizó sobre cuatro sistemas de software de código abierto: ArgoUML, Eclipse-JDT, Mozilla y Samba. Los resultados indican que la naturaleza de los cambios (especialmente los relacionados con refactorizaciones), el diseño del software y el número de desarrolladores activos son factores clave que afectan la entropía por cambios del código fuente. Estos hallazgos son relevantes para comprender el fenómeno del envejecimiento del software, el cual describe cómo los sistemas de software se vuelven más complejos y difíciles de mantener con el tiempo. Así mismo, la investigación resalta la importancia de las prácticas de refactorización y una gestión cuidadosa de los equipos de desarrollo para mitigar los efectos negativos del envejecimiento del software y mejorar la mantenibilidad del código.

II. Prioritizing Refactoring Using 'Code Bad Smells' (Zhang et al., 2011). Este trabajo trata la relación entre cierto código mal formado (Code Bad Smells) identificado por (Fowler, et al., 2002) y las fallas en el software. Se enfoca en la importancia de priorizar la refactorización de ciertos códigos mal formados, como el Código Duplicado y las Cadenas de Mensajes, que se encuentran propensos a estar asociados con fallas en el software. Se utilizan datos de proyectos de código abierto en Java para analizar esta relación y se ofrecen recomendaciones para los desarrolladores sobre cómo priorizar la refactorización para reducir las fallas en el software. Los autores investigan la relación entre seis tipos de código mal formado, identificados por (Fowler et al.) y las fallas en el software, con un enfoque en la priorización de la refactorización. Se sugiere que el Código Duplicado y las Cadenas de Mensajes están más asociados con fallas en el software y, por lo tanto, deberían ser priorizados para la refactorización. Por otro lado, los Racimos de Datos, las Declaraciones de condicionales de conmutación (Switch) y la Generalidad Especulativa son menos propensos a causar fallas. El estudio utilizó datos de código fuente de proyectos Eclipse y Apache Commons, identificando fallas a través de correcciones de errores en el repositorio de código. Los resultados obtenidos ofrecen orientación a los desarrolladores de software sobre cómo priorizar los códigos mal formados para la refactorización, con el objetivo de reducir las fallas en el software.

III. Automatic Detection of 'Code Smells' Caused by Null Checking Conditions in Java Programs (Sirikul & Soomlek, 2016). Este estudio se centra en la detección automática de los “códigos mal formados" (code smells) que son indicativos de problemas más profundos en el código fuente, específicamente en programas Java. Estos problemas suelen ser causados por deficientes prácticas de programación o inadecuados diseños de software. Los “códigos mal formados" tratados en este estudio son principalmente la verificación de condicionales nulas redundantes, que pueden llevar a excepciones de puntero nulo y afectar negativamente la calidad del software. El enfoque propuesto utiliza expresiones regulares (RegEx) para identificar patrones específicos de condiciones de verificación de nulos en el código. Los autores comparan su método con el Árbol de Sintaxis Abstracta (AST) tradicional, encontrando que las RegEx proporcionan una mejora significativa en la detección de estos “códigos mal formados". El estudio emplea proyectos Java de código abierto para validar la efectividad del método.

ISSN: 2992-8338

Los resultados muestran que el enfoque puede detectar eficazmente problemas como código duplicado, introducción de objetos nulos, y problemas en comparación de cadenas que involucran condicionales nulas. Además, se discute la utilidad de estas detecciones en el proceso de refactorización del código para mejorar la mantenibilidad y calidad del software.

IV. Green software: Refactoring approach (Sehgal, Mehrotra, et al, 2020). Este estudio explora el impacto de la refactorización en el consumo de energía en aplicaciones basadas en Java mediante la identificación y eliminación de “códigos mal formados". El objetivo del estudio es mejorar la eficiencia del código y reducir las pérdidas de energía. La metodología implica seleccionar aplicaciones Java de GitHub, identificar “códigos mal formados", refactorizar manualmente el código y medir el consumo de energía utilizando Microsoft Joulemeter. Los resultados muestran una correlación entre la refactorización y la reducción del consumo de energía. El estudio investiga el impacto de los “códigos mal formados" en el consumo de energía en aplicaciones basadas en Java. Los “códigos mal formados" se detectan utilizando Jdeodorant y se aplican técnicas de refactorización para reducirlos. El estudio muestra una mejora significativa en el consumo de energía del código refactorizado.

3. MATERIALES Y MÉTODO

En este artículo se presenta una herramienta automática para evaluar el grado de entropía presente en sistemas de software legados derivado por código dispensable. Código dispensable se refiere a aquel formado por: arquitecturas de clases que contienen atributos, variables de referencia, métodos y clases que no contribuyen a los objetivos finales del sistema, incluyendo también la presencia de clases y métodos nulos (Alexander, 2019), presente en sistemas de software legados. El método contempla dos fases: detección y valoración.

1) Por medio de un analizador estático con capacidades semánticas avanzadas se identifican los diferentes factores de código dispensable y se recaba la información necesaria y suficiente para cuantificar el nivel de entropía generada por dicho código.

2) La entropía es cuantificada para efectos de priorizar las acciones semánticas de refactorización según su impacto potencial en la calidad del software.

3.1 SISTEMA DE MEDICIÓN DE ENTROPÍA DE SOFTWARE

En la Figura 1 se muestra el diagrama de caso de uso del Sistema de Evaluación de Entropía.

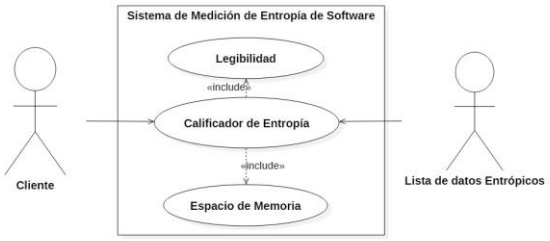


Figura 1 Diagrama UML

Nombre:	D.C.U: 01 Sistema de Medición de Entropía de Software
Descripción	El sistema permite realizar la medición de entropía generada por código dispensable con el fin de cuantificar las declaraciones de métodos, funciones, variables, clases, llamadas a métodos, valores predeterminados, código comentado, los cuales han sido declarados en el sistema, pero que no tiene comportamiento alguno.
Actores:	Usuario fisco o lógico
Precondiciones:	1.- El código a medir deberá estar escrito en lenguaje JAVA en su versión 8.5. 2.- Para poder llevar a cabo la medición, el código debe respetar el paradigma de programación orientada a objetos. 3. El código debe estar limpio de errores de sintáxis. 4.- El código debe contener algún tipo de código dispensable, ya que si no existiera se entendería que el código no presenta problemas en cuestión a código dispensable.
Flujo de Eventos:	1.- Seleccionar los archivos con código escrito en lenguaje java de un sistema a medir. 2.- Se llevará a cabo la medición de entropía del Código.
Excepciones:	1.- Archivo No Encontrado: Se intenta seleccionar un archivo que no existe o no está accesible en el momento de la ejecución. 2.- Formato de Archivo Incorrecto: El archivo seleccionado no es un archivo java válido o está corrompido.

ISSN: 2992-8338

	3.- Fallo en Análisis: Errores durante el análisis debido a incompatibilidades o errores en el código fuente que impiden su procesamiento correcto. 4.-Código Fuente Sin Elementos Dispensables: El análisis identifica que no hay elementos dispensables en el código fuente, lo que impide la medición. 5.-Interrupción del Proceso: El proceso de medición es interrumpido por el usuario o por fallos del sistema.
Postcondiciones:	1.- Resultados de Entropía Presentados: Al finalizar la medición, el sistema presenta un reporte detallado de la entropía del código. Este reporte incluye la cuantificación de métodos, funciones, variables, clases, llamadas a métodos, valores predeterminados y código comentado que son considerados dispensables. 2.- Notificaciones al Usuario: Si el sistema identifica que no existen elementos dispensables en el código fuente, notifica al usuario que el código está libre de este tipo de entropía, lo que podría indicar un código limpio y eficiente en este aspecto. 3.- Estado del Sistema: El sistema vuelve a su estado inicial listo para realizar una nueva medición, asegurando que no hay cambios persistentes que afecten futuras operaciones. 4.- Resolución de Excepciones: Cualquier excepción que ocurra durante el proceso es manejada adecuadamente y se informa al usuario sobre el problema, incluyendo recomendaciones sobre cómo proceder para resolverlo.

Tabla 1 Descripción del Caso de Uso

3.1 PROCESO DE MEDICIÓN DE CÓDIGO DISPENSABLE

3.1.2 INDICADORES DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE ENTROPÍA DE SOFTWARE.

Para determinar los mejores indicadores de legibilidad del código fuente, llevamos a cabo un experimento detallado. Iniciamos con una muestra de código en Java, seguido de una encuesta para evaluar las percepciones de los participantes sobre la legibilidad de este código. Posteriormente, aplicamos un análisis de correlación regresión para explorar las relaciones entre los indicadores propuestos y la legibilidad. Este análisis ~~nos~~ permitió formular una ecuación preliminar con pesos específicos para cada indicador. Finalmente, en la fase de optimización, buscamos identificar los indicadores más eficaces para evaluar la legibilidad del código, minimizando el número de éstos y manteniendo un nivel de explicación adecuado. A continuación, se detallan los indicadores seleccionados para esta métrica:

1) Número de Comentarios (numOfComments): La presencia de comentarios en el código ha sido correlacionada positivamente con la legibilidad. Los comentarios ayudan a explicar la lógica y las decisiones de diseño detrás del código, facilitando la comprensión para otros desarrolladores (Buse & Weimer, 2008).

2) Longitud Promedio de las Líneas (AverageLineLength): La longitud de las líneas de código influye directamente en la legibilidad. Códigos con líneas más cortas y concisas tienden a ser más legibles que aquellos con líneas extensas y complejas (Posnett et al., 2011).

3) Complejidad de Control (maxNestedControl): Este indicador mide el nivel máximo de anidamiento en estructuras de control como bucles y condicionales. La literatura sugiere que una menor complejidad en estas estructuras está asociada con una mayor legibilidad (Halstead, 1977).

4) Volumen del Programa (ProgramVolume): Basado en la métrica de Halstead, este indicador refleja el tamaño y la complejidad del programa. Un mayor volumen puede ser indicativo de un código más complejo y potencialmente menos legible (Halstead, 1977).

5) Entropía (Entropy): La entropía se usa para cuantificar la complejidad y el desorden dentro de un código. Un nivel alto de entropía puede indicar que el código es difícil de entender y mantener, afectando negativamente su legibilidad, dada por la siguiente fórmula de la investigación de (Buse & Weimer, 2008).

$$H(X) = \sum_{i=1}^{n} P(x_i)\log_2 P(x_i)$$

Donde X es un documento y xi es un término en X. P(xi) es la probabilidad de un cambio que ocurre en un documento, n es el número total de documentos, en nuestro caso, archivos fuente.

Se utilza la función:

$$1/(1+e^{-z})$$

para calcular la puntuación de legibilidad real. Esto normaliza los resultados están en el rango [0, 1].

6) Número de Operadores Lógicos y Aritméticos (numOfLogicalOperators, numOfArithmaticOperators): La densidad de operaciones en un segmento de código puede complicar su comprensión. Se ha encontrado que una menor

ISSN: 2992-8338

densidad de estos operadores está asociada con una mejor legibilidad (Buse & Weimer, 2008).

El análisis de estos indicadores, combinado con análisis de correlación, permitirá obtener una medición precisa de la legibilidad y ajustar el código para mejorar su claridad y mantenibilidad.

3.1.3 INDICADORES DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE ESPACIO DE MEMORIA DEL SOFTWARE

La Máquina Virtual de Java ofrece herramientas integradas como **MemoryMXBean** para obtener estadísticas de uso de memoria RAM, utilizando comandos como **jmap** y **jcmd**, que proporcionan un histograma de la memoria ocupada. Estos histogramas son esenciales para analizar el consumo de memoria por clase, permitiendo identificar potenciales fugas de memoria o ineficiencias.

El proceso comienza con la creación de un objeto “Histogramer” que al ejecutarse produce un “MemoryHistogram”. Este histograma muestra el número de instancias y el tamaño total de memoria usado por cada clase. Además, permite obtener diferencias entre dos histogramas tomados en distintos tiempos, lo cual es esencial para identificar fugas de memoria o para optimizar el uso de la memoria antes y después de realizar ciertas operaciones críticas en el código como por ejemplo la Refactorización de código.

Es importante considerar que previo a la ejecución de estos comandos, se requiere una recolección completa de basura antes de ejecutarse. Por esta razón, no se recomienda su uso en ambientes de producción. Idealmente, estas mediciones deberían llevarse a cabo en un entorno de prueba o durante el desarrollo para evitar un impacto negativo en el rendimiento en vivo.

4. PRUEBAS PRELIMINARES

Se implementó y realizó un sistema analítico soportado con el metalenguaje ANTLR (Parr, 2013) para analizar archivos de código Java. Este sistema cuantifica los aspectos planteados que influyen en la legibilidad y mantenibilidad del código. Entre estas métricas se incluyen líneas de código (LOC), número de comentarios, líneas en blanco, utilización de operadores bit a bit, profundidad máxima de estructuras de control anidadas, volumen del programa y entropía.

El análisis se lleva a cabo mediante un lexer y un parser generados por ANTLR, que interpretan el código fuente y construyen un árbol sintáctico. Un CustomListener, como el que se muestra en la Figura 2 fue desarrollado específicamente para este propósito, recorre este árbol y recolecta los datos necesarios para calcular la legibilidad según una fórmula predefinida. Este proceso identifica elementos cuantificables y también evalúa características estructurales complejas del código, así como la profundidad de anidamiento de las estructuras de control. Para validar la eficacia de este sistema, se realizó una evaluación preliminar utilizando como caso de estudio el "Hospital Project" (Deniz, 2023). Este proyecto consta de 32 clases de Java y fue seleccionado debido a su tamaño moderado y complejidad, que son representativos de muchos proyectos reales en entornos de desarrollo de software. Se utilizó la Métrica de Legibilidad:

Legibilidad = (-0.020) * (LOC) + (0.040) * (# de comentarios) + (0.037) * (# de líneas en blanco) + (-0.755) * (# de operadores bit a bit) + (-0.153) * (control anidado máximo) + (-0.001) * (Volumen de programa) + (-0.611) * (Entropía)

El sistema calculó una puntuación de legibilidad de 0.39 para el "Hospital Project" (Deniz, 2023), en una escala donde 1 representa la máxima legibilidad posible. Este resultado subraya una legibilidad considerablemente baja, lo cual es indicativo de áreas potenciales para mejorar la claridad y la estructura del código.

```
public void visitTerminal(ParseTree node) {
    if (node.getText().matches("^\\s*$")) {
        blankLines++;
    }
    // contar comentarios
    if (node instanceof TerminalNode terminalNode) {
        if (terminalNode.getSymbol().getType() == JavaParser.LINE_COMMENT ||
            terminalNode.getSymbol().getType() == JavaParser.COMMENT) {
            numComments++;
        }
    }
    // Operadores logicos
    if (node.getText().matches("<<|>>|>>>|&|\\||\\^")) {
        bitwiseOperators++;
    }
}

@Override
public void enterStatement(JavaParser.StatementContext ctx) {
    if (ctx.IF()!= null || ctx.forControl() != null ||
        ctx.WHILE()!= null || ctx.DO()!= null) {
        currentNestedControl++;
        maxNestedControl = Math.max(maxNestedControl, currentNestedControl);
    }
}
```

Figura 2 CustomListener

El análisis detallado del uso del heap en la Máquina Virtual Java (JVM) , utilizando los comandos **jmap** y **jcmd,** constituye una parte esencial de la gestión de recursos y optimización del rendimiento en aplicaciones Java. En el estudio, se llevó a cabo una evaluación del consumo de memoria de la aplicación "Hospital Project", un proyecto de código abierto desarrollado por Fatih Deniz, mediante la instrumentación de la JVM para capturar datos en tiempo real sobre la ocupación del montón por diferentes tipos de objetos.

La Figura 3 ilustra los resultados de esta medición, mostrando una lista detallada de los objetos Java, junto con la cantidad de memoria que cada uno ocupa, expresada en bytes. Los datos revelan que los tipos de datos como **byte[]**, **java.lang.Object[]**,

ISSN: 2992-8338

y **java.lang.String** son los que más espacio consumen en el heap, indicando una intensiva gestión de datos binarios, referencias a objetos y cadenas de texto dentro de la aplicación.

La comprensión detallada del uso del heap ayuda a identificar potenciales ineficiencias y fugas de memoria, que son críticas para aplicaciones que requieren alta disponibilidad y rendimiento. Por ejemplo, un uso excesivo de **byte[]** podría sugerir la necesidad de optimizar el manejo de arreglos de bytes, quizás considerando alternativas más eficientes en términos de memoria o ajustando el tamaño de estos arreglos de acuerdo con el uso real.

Name	Live Bytes
byte[]	1,879,512 B
java.lang.Object[]	556,712 B
java.lang.String	523,056 B
char[]	392,576 B
java.util.TreeMap$Entry	372,720 B
java.lang.Class	363,144 B
java.lang.reflect.Method	178,112 B
int[]	168,488 B
java.util.HashMap$Node	157,376 B
Ljdk.internal.vm.FillerArray;	156,632 B
java.util.concurrent.ConcurrentHashMap$Node	144,192 B
java.util.HashMap$Node[]	133,544 B
java.io.ObjectStreamClass	104,400 B
java.lang.String[]	75,792 B
java.util.LinkedHashMap$Entry	75,560 B
java.util.HashMap	66,384 B
java.lang.invoke.MemberName	59,328 B
java.lang.Class[]	56,936 B
java.util.ImmutableCollections$List12	52,104 B
java.util.concurrent.ConcurrentHashMap$Node[]	50,400 B

Figura 3 Heap de Java

5. DISCUSIÓN

Este estudio ofrece una contribución al campo de la refactorización de software, proponiendo una herramienta automatizada para medir la entropía en aplicaciones Java. Sin embargo, como es común en desarrollos de esta índole, enfrenta limitaciones que pueden impactar su aplicabilidad y efectividad en entornos de producción diversificados.

La herramienta propuesta es de aplicación exclusiva al código escrito en lenguaje Java. Aunque Java es ampliamente utilizado en la industria, la exclusividad del lenguaje restringe la aplicabilidad de la herramienta a proyectos que no utilicen Java como lenguaje de programación. Esta herramienta podría no manejar eficazmente los sistemas de software de gran escala o aquellos que presentan arquitecturas altamente complejas y distribuidas, lo que podría limitar su uso en proyectos corporativos de gran envergadura que operan en entornos de microservicios o arquitecturas orientadas a servicios.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El impacto práctico del desarrollo de esta herramienta de análisis de entropía y espacio de memoria su ubica en el ahorro en energía, en reducción de espacios de memoria y en el aumento al tiempo de vida útil del sistema legado corregido; puesto que se disminuye la fragilidad, derivada al impedirse la manipulación manual excesiva para corregir defectos.

La herramienta desarrollada ha demostrado ser eficaz en la identificación de elementos de código que contribuyen significativamente a la entropía del software, la cuál por el momento es corregida manualmente. Los elementos de código dispensable, identificados a través de un análisis estático avanzado, incluyen principalmente:

a) Código Comentado: La presencia de bloques de código comentado en diferentes partes del software no solo incrementa la cantidad de código a mantener, sino que también eleva la complejidad y la probabilidad de errores durante futuras modificaciones.

b) Código Muerto y Obsoleto: En grandes sistemas legados, existen líneas o secciones de código que ya no se utilizan o que han sido superadas por nuevas implementaciones.

c) Mala Gestión de Excepciones: Códigos que manejan las excepciones de manera inapropiada o insuficiente pueden causar comportamientos inesperados en tiempo de ejecución, aumentando así la entropía del sistema.

d) Complejidad Ciclomática Alta: Métodos o funciones con múltiples bifurcaciones (if, else, switch, loops) tienden a ser más difíciles de entender y probar, lo que aumenta la probabilidad de errores y la dificultad para realizar mantenimiento.

La eficacia de la herramienta en la identificación de estos elementos se demostró mediante pruebas en proyectos de software de código abierto, donde se aplicó comparativamente la métrica de legibilidad antes y después de aplicar una refactorización manual.

Estos hallazgos son importantes para comprender cómo la refactorización puede contribuir a la reducción de la entropía en proyectos de software, y refuerzan la importancia de herramientas de este tipo en la gestión efectiva de la calidad del software a largo plazo.

El enfoque propuesto para investigaciones futuras implica el desarrollo de una herramienta automática avanzada que utilize ANTLR (Another Tool for Language Recognition) para analizar y refactorizar código Java automáticamente. Esta herramienta deberá ser diseñada para detectar y eliminar código dispensable, utilizando las métricas específicas de legibilidad y

ISSN: 2992-8338

uso de espacio de memoria descritas en este artículo. La funcionalidad clave incluirá:

1.- Detección Automática: La herramienta utilizará ANTLR para parsear el código fuente Java y detectar automáticamente elementos de código dispensables como métodos, clases y variables sin uso, así como bloques de código redundantes. 2.-Refactorización: Una vez identificados los elementos dispensables, la herramienta propondrá y aplicará automáticamente las refactorizaciones necesarias para eliminar o modificar estos elementos, asegurando que el código final sea funcionalmente equivalente al original. 3.-Medición de Mejoras: Antes y después de la refactorización, la herramienta evaluará la legibilidad y el uso de espacio de memoria utilizando las métricas detalladas en este estudio. Esto incluirá la medición de la complejidad del código, el volumen del programa, y la entropía, así como análisis detallados del uso del heap en la Máquina Virtual de Java. 4.- Reporte de Resultados: Proporcionará reportes detallados que muestren las mejoras en legibilidad y eficiencia de memoria, permitiendo a los desarrolladores y equipos de software evaluar el impacto de la refactorización.

Esta herramienta no solo facilitará la gestión del código Java en proyectos existentes, sino que también promoverá prácticas de desarrollo más limpias y eficientes. Además, se espera que la automatización del proceso de detección y refactorización ahorre tiempo significativo durante el ciclo de desarrollo de software y mejore la calidad general del software producido.

7. REFERENCIAS

1.- Al Dallal, J., & Abdin, A. (2017). Empirical evaluation of the impact of object-oriented code refactoring on quality attributes: A systematic literature review. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 43(1), 1-24.

2.- Buse, R. P. L., & Weimer, W. R. (2008). Learning a metric for code readability. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 34(5), 1-12.

3.- Canfora, G., Cerulo, L., Cimitile, M., & Di Penta, M. (2014). How changes affect software entropy: An empirical study. *Empirical Software Engineering, 19*(1), 1-38.

4.- Deniz, F. (2023). HospitalProject. Recuperado el 01 de enero de 2024, de https://github.com/fdeniz07/HospitalProject

5.- Fowler, M., Beck, K., Brant, J., Opdyke, W., & Roberts, D. (2002). Refactoring: Improving the design of existing code. Addison-Wesley.

6.- Halstead, M. H. (1977). Elements of software science. North-Holland.

7.- Jacobson, I. (1992). Object-oriented software engineering: A use case driven approach. Addison-Wesley.

8.- Kitchenham, B. A., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Technical Report EBSE-2007-01.

9.- Lara, L. R. (2004). El efecto de la entropía en los softwares multimediales educativos. *Revista Iberoamericana de Educación*, 34(2), 1-13. https://doi.org/10.35362/rie3422996.

10.- Liskov, B. (1988). Data abstraction and hierarchy. *SIGPLAN Notices*, 23(5).

11.- Parr, T. (2013). The definitive ANTLR 4 reference (2nd ed.). Pragmatic Bookshelf.

12.- Posnett, D., Hindle, A., & Devanbu, P. (2011). A simpler model of software readability. In *Proceedings of the 2011 ACM/IEEE International Conference on Software Engineering* (pp. 1-4). ACM.

13.- Sehgal, R., Mehrotra, D., Nagpal, R., & Sharma, R. (2020). Green software: Refactoring approach. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 34(2022), 4635-4643.

14.- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal, 27*, 379–423, 625–656.

15.- Shvets, Alexander. (2019). *Dive into refactoring*. Refactoring GURU.

16.- Significados. (2010). Significado de entropía. Recuperado el 19 de octubre de 2022, de https://www.significados.com/entropia/

17.- Sirikul, K., & Soomlek, C. (2016). Automated detection of code smells caused by null checking conditions in Java programs. In *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)* (pp. 1-6). IEEE.

18.- Software Guru. (2019, noviembre 29). Muestra de casos reales de arquitectura de software. REAL. Recuperado el 28 de abril de 2024, de https://sg.com.mx/real/.

19.- Zhang, M., Baddoo, N., Wernick, P., & Hall, T. (2011). Prioritising refactoring using code bad smells. In *Proceedings of the 2011 Fourth International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops* (pp. 458-464). IEEE.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Desacoplamiento activo en sistemas conectados a red: arquitectura unipolar de Capacitores Conmutados Apilados

Omar Rodriguez Benitez*. Mario Ponce Silva* Ricardo Eliu Lozoya Ponce**

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ingeniería Electrónica, CP 62490 Cuernavaca, Morelos (e-mail: d19ce044@cenidet.tecnm.mx)*

*** Tecnológico Nacional de México - Campus Chihuahua Av. Tecnológico 2909, Tecnológico, 31200 Chihuahua, Chih. (e-mail: ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx)*

Abstract: Due to their short lifespan, single-phase grid-connected systems face limitations when using electrolytic components. Nevertheless, they are necessary because of the power oscillation between the DC and AC sides. This oscillation causes low-frequency ripple that must be mitigated by the coupling component, which is often an electrolytic capacitor due to its high energy density. To avoid using these components, there are active decoupling alternatives. These methods effectively mitigate the ripple issue at twice the grid frequency (2ω), and although they add more complexity to the system, they avoid using components with a short lifespan. This work provides a direct approach to the SSC architecture as a decoupling technique, using a 200W Cuk converter as a case study. Simulation results and a comparison with other reported techniques are presented to validate the performance.

Keywords: *Maximum Power Point Tracking*, *Alternating Current, Direct current, Decoupling, stacked switched capacitor.*

1. INTRODUCCIÓN

En diversas aplicaciones, como la energía solar conectada a la red eléctrica, sistemas de iluminación LED y sistemas de alimentación ininterrumpida, los inversores monofásicos son fundamentales para convertir la energía solar de corriente continua (CD) a corriente alterna (CA) Shukir (2021). Estas aplicaciones requieren una potencia de entrada con un rizo pequeño y constante, así como una potencia de salida que varía al doble de la frecuencia de red. Esta variación provoca la necesidad de elementos de gran capacidad para procesar el excedente de energía y lograr un equilibrio energético.

Una aplicación conectada a la red mediante paneles fotovoltaicos se muestra en la Figura 1. La primera etapa (C_p), permite ondulaciones de baja frecuencia, la segunda etapa aumenta el nivel de voltaje de la fuente fotovoltaica. Las etapas tercera y cuarta representan el capacitor de desacoplamiento (C_e) y el inversor, respectivamente. Por último, la quinta etapa filtra la señal sinusoidal mediante un filtro L.

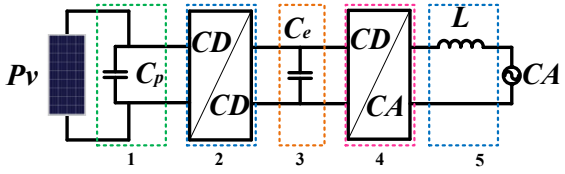


Figura 1. Esquema convencional de un panel conectado a red.

El uso de componentes pasivos, como capacitores electrolíticos para almacenar el exceso de energía, puede degradar la forma de onda, reducir el rendimiento y afectar el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) Kumar, Panda, Rosas-Caro, Valderrabano-Gonzalez, & Panda (2023). A pesar de su popularidad debido a su alta densidad de energía y bajo costo, los capacitores electrolíticos presentan limitaciones, como mala utilización de la energía, restricciones a altas temperaturas, baja vida útil y aumento del tamaño del sistema J. Sun, Luo, & Li (2022).

Para abordar estos desafíos, la literatura consultada propone soluciones desde enfoques de desacoplamiento de potencia pasivos y activos. Diversos trabajos destacan estrategias para mejorar el equilibrio energético sin comprometer la calidad de la forma de onda ni el rendimiento del sistema. La ondulación al doble de la frecuencia de red también es la que provoca diversos problemas en los sistemas utilizados para la interconexión con la red eléctrica. Estos problemas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Efectos de la ondulación de potencia de CA

Sistema	Efecto en el sistema	Causa y restricción	Referencia
Capacitor de enlace	Baja vida útil del capacitor	Gran resistencia serie equivalente	Simon (2020)
MPPT	Baja eficiencia	Alto rizo de oscilación	Abdulrazzaq, Ali, & System, (2018)
Baterías	Afectan a los electrodos y al electrolito	Calentamiento por histéresis	Aberoumand, Woodfield, (2020)
LED´s	Efecto de “Flicker”, fatiga visual.	El parpadeo debe limitarse al 10%	Batra, (2019)

De lo anterior, se sabe que desafortunadamente los capacitores electrolíticos presentan limitaciones de temperatura y reducida vida útil, lo que los vuelve indeseables para aplicaciones de alta confiabilidad. Por lo que el desafío al tener un almacenamiento de energía variable en el tiempo para aplicaciones de conversión monofásica está bien establecido.

ISSN: 2992-8338

En contraste con los capacitores electrolíticos, los capacitores cerámicos presentan mayor vida útil. Sin embargo, la sustitución directa de esta tecnología por los capacitores electrolíticos no es posible debido a la diferencia de densidad de energía que existe entre ellos, por lo que es necesario tener en cuenta esquemas que hagan posible reducir la cantidad de energía que debe ser almacenada en el enlace de CD, con el objetivo de optar por el uso de componentes que en principio ayuden a incrementar la vida útil del sistema completo.

2. SISTEMAS DE DESACOPLAMIENTO

Para reducir el excedente de energía en el componente de enlace en aplicaciones interconectadas a la red eléctrica, los métodos de desacoplamiento de potencia, normalmente se hacen incluyendo interruptores activos, así como unidades para almacenar energía, estos sistemas se aplican en cualquier aplicación que requiera la conversión CA-CD y CD-CA.

Los sistemas de desacoplamiento de potencia se clasifican en dos: independientes, los cuales funcionan aparte del convertidor original y dependientes, los cuales comparten los semiconductores del convertidor.

Estos sistemas también son conocidos como método de desacoplamiento pasivo y el método de desacoplamiento activo, mismos que se muestran en la Figura 2.

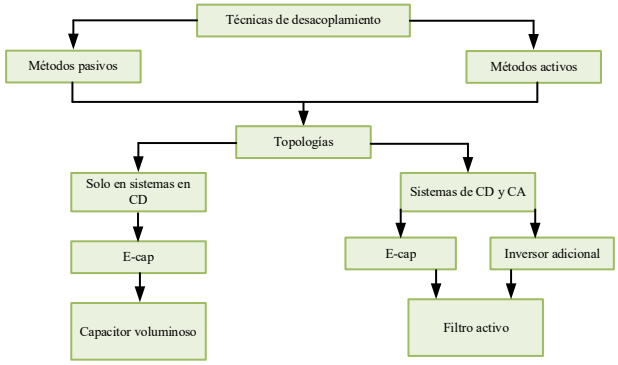


Figura 2. Clasificación de las técnicas de desacoplamiento

Los enfoques pasivos se centran únicamente en la utilización de componentes pasivos, como capacitores, pero de un gran tamaño. A pesar de que su implementación es sencilla pues solo implica un elemento, los capacitores pueden ser voluminosos, lo que resulta en una ocupación de espacio y un peso mayor en comparación con las soluciones activas. Por otro lado, los métodos activos presentan múltiples características atractivas. A pesar de introducir más componentes al sistema, se destacan como una solución efectiva para superar las limitaciones asociadas con los componentes electrolíticos Y. Sun, Liu, Su, Xiong, & Yang, (2015).

2.1 Esquemas convencionales

En contraste con el enfoque pasivo, los circuitos activos incorporan un componente adicional de conmutación destinado a almacenar la energía. La Tabla 2, destaca algunas de las ventajas clave que estos métodos ofrecen.

Tabla 2. Estrategias de desacoplamiento

Referencia	Ventajas	Desventajas
Pan et al., (2019)	Uso eficiente de capacitores de película	La eficiencia de esta solución es limitada
Isik, Alharbi, & Bhattacharya (2021)	Posibilita el uso de capacitancias reducidas	No son convenientes para aplicaciones fotovoltaicas
Liu et al., (2021)	Presentan una distorsión de CA baja	No apropiadas para aplicaciones fotovoltaicas conectadas a la red.
Fan, Xue, & Zhang, (2012)	Logra una reducción del componente de enlace	Genera un voltaje elevado a través de los dispositivos
Zhang, Ding, Wang, Guo, & Padmanaban, (2019)	Utiliza componentes de menor tamaño	Muestra eficiencias reducidas y aumento del tamaño del sistema

A diferencia de las estrategias de desacoplamiento presentadas en la Tabla 32, se destaca un método activo con características mejoradas que son los capacitores conmutados apilados (SSC) McHugh et al., (2016). En la Tabla 3, se muestran las ventajas y desventajas de esta técnica.

Tabla 3. Características de los SSC

Técnica	Ventajas	Desventajas
SSC Afridi, Chen, & Perreault, (2013)	La técnica SSC permite casi duplicar la densidad de energía, logra mayor eficiencia que los convertidores CD-CD convencionales, y realiza conmutaciones a múltiplos bajos de la frecuencia de la línea para minimizar pérdidas de conmutación.	Complejidad elevada

La elección de los SSC como técnica preferida para el desacoplamiento de potencia se fundamenta en primer lugar, la capacidad de los SSC para reducir significativamente el tamaño del capacitor es un atributo clave. Gracias a la topología apilada, permiten obtener una mayor capacidad de almacenamiento en un espacio más reducido, lo cual es crucial en aplicaciones donde el espacio físico es limitado y se busca una alta densidad de energía.

Adicionalmente, la versatilidad de los SSC para adaptarse a una variedad de aplicaciones y requisitos específicos del sistema destaca como un factor determinante. Ofrecen flexibilidad en términos de configuración y diseño, lo que facilita su integración en sistemas con diferentes necesidades de desacoplamiento Rodríguez-Benítez et al., (2023).

Otro beneficio clave es la capacidad para reducir las pérdidas magnéticas y de conmutación. La topología apilada minimiza las pérdidas de energía asociadas con el proceso de conmutación, contribuyendo así a una mayor eficiencia en la gestión de la potencia. Esta eficiencia energética es esencial para optimizar el rendimiento del sistema y reducir la disipación de calor, mejorando la confiabilidad y la vida útil de los componentes.

ISSN: 2992-8338

2.2 Arquitectura SSC

Esta arquitectura consiste en agregar al sistema circuitos de conmutación adicionales, los cuales incluyen bloques de capacitores e interruptores, mismos que ayudan a la eliminación del uso de componentes electrolíticos en el desacoplamiento de potencia.

Dentro de estos bloques existen dos grupos, el bloque principal y el bloque de soporte, como lo muestra la Figura 3, en el bloque principal se tienen los componentes que reflejan el comportamiento del capacitor de enlace como si este fuera solo un componente, el bloque de soporte incluye los componentes que ayudan a mantener el nivel de tensión en el bloque principal y así poder cumplir con la cantidad de energía necesaria para poder satisfacer la demanda de la carga.

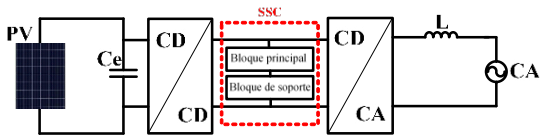


Figura 3. Esquema de la arquitectura SSC

De la Figura 3, los circuitos de desacoplamiento se presentan en dos arquitecturas generales, la arquitectura unipolar (Figura 4), y la bipolar (Figura 5).

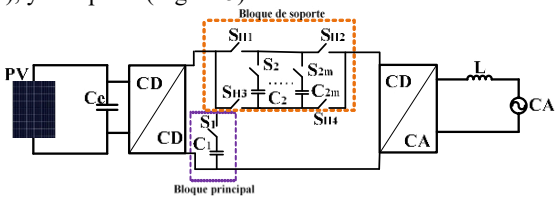


Figura 4. Arquitectura unipolar

Del esquema en la Figura 4, el bloque principal se compone de los elementos C_1 y S_1, denotando de esta forma que para los sistemas unipolares el rango de energía será menor al del sistema bipolar.
Por otro lado, el sistema bipolar destaca debido a que el número de capacitores e interruptores dentro del bloque principal pueden ser tantos como sean necesarios para satisfacer las necesidades de la aplicación seleccionada.
Otra diferencia se encuentra en el bloque de soporte en donde para un sistema bipolar se presenta un puente "H" conformado por (S_{H1}, S_{H2}, S_{H3}, S_{H4}) para poder conmutar de distintos modos los capacitores de soporte con los principales.

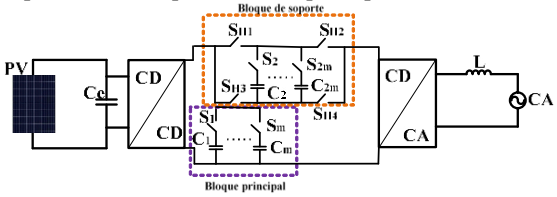


Figura 5. Arquitectura SSC bipolar

Las dos arquitecturas funcionan permitiendo el paso de voltaje entre los bloques que las conforman, es decir permiten que en el bloque principal y de soporte los capacitores se puedan cargar y descargar, teniendo con esto que una mayor cantidad de energía almacenada se pueda utilizar como amortiguador de energía y esto a su vez ayude a mantener el nivel en el bus de CD que se desea para mantener la carga deseada.
Adicionalmente la arquitectura unipolar tiene un diseño en los bloques de soporte para que los capacitores puedan tener una conexión serie con el capacitor del bloque principal, mientras que la arquitectura bipolar está diseñada para que las conexiones entre estos bloques puedan ser serie o paralelo.

Los capacitores para ambas arquitecturas deben precargarse a través de una secuencia específica, para que al comienzo del ciclo de descarga todos los capacitores estén cargados a su nivel máximo, siendo el primero en descargarse el capacitor del bloque principal, ya que el único interruptor activado es el del bloque principal, una vez que el voltaje en el bus de CD alcanza su valor mínimo permitido, el interruptor del bloque principal se apaga para que se activen los interruptores del bloque de soporte, uno a uno irá sumándose al bloque principal para pasar otra vez al nivel mínimo permitido y así utilizar cada uno de los capacitores de soporte, en cada transición los capacitores de soporte se descargan uno a uno para así poder cargar de manera independiente los capacitores que se utilizaron en el ciclo anterior, teniendo todo el tiempo el mismo principio de dejar al capacitor principal descargarse hasta el valor mínimo permitido y sumando en ese punto el nivel de voltaje que anteriormente se almacenó en cada rama del bloque de soporte.

En la Figura 6, se presenta un ejemplo para una arquitectura unipolar de 1 a 3 en donde se muestra el comportamiento de cada uno de los capacitores de soporte (C_2, C_3 y C_4), en donde en cada ciclo de conmutación los capacitores de soporte se suman uno a uno al capacitor principal (C_1) para así obtener el comportamiento deseado para poder amortiguar la energía.

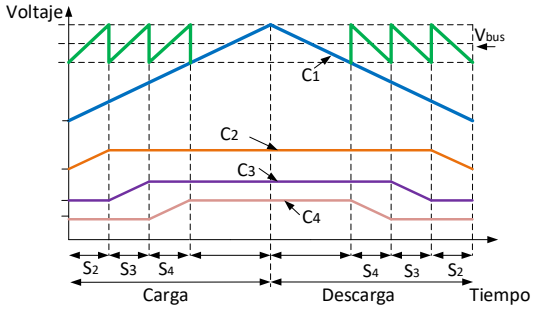


Figura 6. Operación de los capacitores

Un punto clave para lograr una alta eficiencia en la arquitectura SSC, es definir correctamente las conmutaciones mostradas en la Figura 6. La eficiencia del sistema en todo el rango de funcionamiento puede ser especialmente alta porque el sistema sólo funciona a frecuencias de conmutación muy bajas, lo que reduce las pérdidas.

3. CASO DE ESTUDIO

En esta sección, se aborda el diseño del caso de estudio, el cual consiste en la implementación de un convertidor Cuk. La elección de este tipo de convertidor se fundamenta en la necesidad de contar con una corriente no pulsante a la entrada, una característica esencial en aplicaciones fotovoltaicas.

ISSN: 2992-8338

Además, el convertidor Cuk facilita la reducción de armónicos de corriente, necesario para cumplir con los estándares de calidad de la red eléctrica.
Dada la importancia de obtener resultados confiables y comparables, se establecen métricas específicas que nos permitían evaluar de manera precisa el rendimiento de cada componente y etapa del diseño. Estas métricas son esenciales para validar y demostrar de manera cuantitativa por qué los capacitores conmutados apilados (SSC) representan una mejora sustancial en comparación con las arquitecturas convencionales, particularmente en términos de eficiencia y estabilidad en la corriente generada.

3.1 Diseño del convertidor Cuk

Los parámetros de diseño se presentan en la Tabla 4 y la metodología de diseño en la Tabla 5. Cabe mencionar que el voltaje de entrada (V_{in}) se seleccionó basándose en las especificaciones del módulo FV modelo TSM-PDG5, que establece bajo condiciones de irradiancia de 100 $W/m2$ a 25℃, un voltaje en el punto de máxima potencia ($VPMP$) de 30.3 V.

Tabla 4. Parámetros de diseño

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia promedio	P_{avg}	200 W
Frecuencia de red	f_g	60 Hz
Relación de frecuencias	B	250
Porcentaje del rizo de voltaje	$\%5$	15%
Frecuencia de angular en la red	ω	120 π rad/s
Voltaje de los paneles fotovoltaicos	V_{PV}	30.3 V
Voltaje del bus de CD	V_{dc}	210 V
Frecuencia de conmutación	f_{sw}	100 kHz

En la fase inicial se establecen criterios esenciales para la precisión y uniformidad en la operación del sistema. Con el objetivo de garantizar la estabilidad y confiabilidad del diseño, se unificaron los rizos de voltaje y corriente a niveles específicos. Para los rizos de voltaje, se busca mantenerlos dentro de un margen del 5%, mientras que, para los rizos de corriente, se procura limitarlos al 10%.

Tabla 5. Metodología de diseño

Fórmula	Resultado	Fórmula	Resultado
$i_{L1}=\frac{P}{V_{in}}$	6.601 A	$R_{CD}=\frac{Vout}{iout}$	220.5 Ω
$\Delta i_{L1}=.1\cdot i_{L1}$	0.66 A	V_{pp}	162 V
$\Delta V_{C1}=.05\cdot V_{in}$	1.515 V	$I_{CD}=\frac{P}{V_{pp}}$	1.235 A
$C_{CA}=\frac{P}{2\cdot\omega\cdot V_r\cdot V_{cd}}$	601.4 µF	$I_0=\frac{4\cdot I_{CD}}{\pi}$	1.572 A
$\Delta V_{C0}=.05\cdot V_{out}$	10.5 V	$R_{CA}=\left(\frac{P}{I_0^2}\right)$	80.86 Ω
$\Delta i_{L2}=.01\cdot i_{out}$	0.095 A	$C1p=n\cdot\frac{I_{out}\cdot(1-D)}{\Delta V_{c1}\cdot fsw}$	22.11 µF
$L1=\frac{V_{in}D}{\Delta iL1\cdot fsw}$	228.4 µH	$C1s=\frac{I_{out}\cdot(1-D)}{\Delta V_{C0}\cdot fsw}$	0.455 µF
$L2=\frac{V_{out}(1-D)}{\Delta iL2\cdot fsw}$	11.025 mH	$C2=\frac{V_{out}(1-D)}{L2\cdot\Delta V_{c0}\cdot fsw^2\cdot 8}$	0.12 µF

3.2 Diseño de la arquitectura SSC

A continuación, se presentan las Tablas 6 y 7, que detallan los parámetros clave y la metodología de diseño para la arquitectura de capacitores conmutados apilados en su versión unipolar. Este enfoque específico en la versión unipolar resalta una significativa reducción en la capacidad de los capacitores, los cuales ahora se han reducido a 15 µF en comparación con el capacitor original (C_{CA}) de 600 µF.

Tabla 6. Consideraciones de la arquitectura SSC

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia	P_{cd}	200 W
Frecuencia de red	f	60 Hz
Número de capacitores de columna	n	1
Numero de capacitores de soporte	m	3
Voltaje máximo	$V_{máx}$	270 V
Voltaje mínimo	$V_{\min}$	140 V
Voltaje nominal	V_{nom}	210 V
Porcentaje de rizo en el bus de CD	Rv	10 %
Frecuencia angular	ω	377 rad/s

Tabla 7. Metodología de diseño de la arquitectura unipolar

Fórmula	Resultado
$\Delta=n\left[\left(1+(m+1)Rv\right)^2-\left(1-(m+1)Rv\right)^2\right]$	1.6
$C=\frac{2\cdot P_{CD}}{\Delta\cdot Vnom^2\cdot\omega}$	15 µF

4. RESULTADOS

Cuando se conecta el puerto de corriente alterna al convertidor, el aumento significativo en la capacidad del capacitor de enlace de ($C2$) 0.12 µF a 601.5 µF se debe a la naturaleza del sistema y sus demandas operativas.

El aumento en la capacidad del capacitor de enlace se relaciona directamente con la necesidad de almacenar y liberar energía de manera eficiente, especialmente porque la potencia en CA varía al doble de la frecuencia de red, como lo muestra la Figura 7. Esto requiere una mayor capacidad y permite al sistema gestionar las fluctuaciones en la entrada de corriente alterna, suavizando así el voltaje de salida y garantizando un suministro continuo y estable de energía.

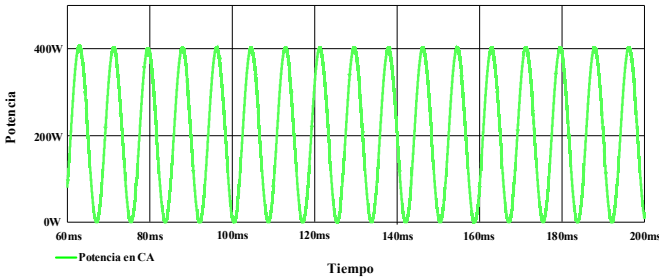


Figura 7. Variación a la salida del inversor

ISSN: 2992-8338

Otro parámetro crucial para validar de manera efectiva el funcionamiento del sistema es el rizo de voltaje, un indicador significativo definido en la metodología de diseño. En este contexto, es particularmente notable que el propio rizo de voltaje no excede los 5 V, mostrado en la Figura 8.

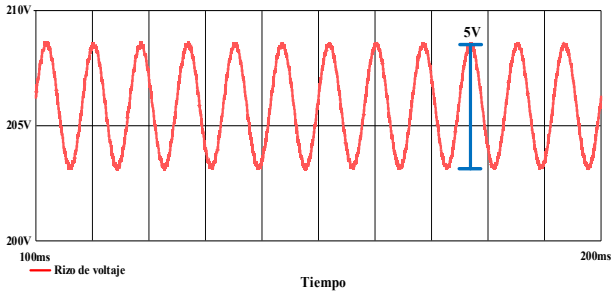


Figura 8. Rizo de voltaje

5. CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados recopilados en la Tabla 8, se pueden extraer conclusiones significativas que demuestran en principio la reducción sustancial de un capacitor de 600 µF a tan solo 4 capacitores de 15 µF. Esta significativa disminución en la capacidad capacitiva no solo implica una eficiencia mejorada, sino también una optimización en términos de espacio y costos asociados a los componentes.

Es crucial resaltar que la topología SSC no exige la utilización de componentes de última generación, dado que para el enlace opera a una frecuencia de conmutación relativamente baja (60 Hz). Esta característica fundamental reduce los costos de implementación, posicionando al sistema como una alternativa rentable para diversas aplicaciones CD-CA.

La inclusión de la sección de dispositivos de conmutación en la comparativa revela una consideración esencial: la necesidad de evaluar no solo el rendimiento del sistema en términos de desacoplamiento de potencia, sino también la cantidad de componentes requeridos. Aunque algunos sistemas en la literatura proponen soluciones eficientes, su complejidad y el número elevado de componentes pueden afectar negativamente la viabilidad práctica y económica.

El interés reciente en la mitigación del uso de componentes electrolíticos es evidente en la tabla comparativa, reflejando una tendencia hacia soluciones más sostenibles y duraderas. En este contexto, la topología SSC demuestra ser competente, ya que no solo reduce la dependencia de componentes electrolíticos, sino que también mantiene una eficiencia notable.

Un parámetro crítico a considerar es la energía consumida por cada sistema en el enlace. La eficiencia energética del sistema SSC, tal como se presenta en la literatura, se destaca incluso en comparación con sistemas más recientes. Este hecho subraya la robustez y eficacia de la topología propuesta, manteniendo el interés en explorar nuevas metodologías que exploren la optimización continua, particularmente en la reducción adicional del componente de enlace mediante variaciones en los valores de capacitancia.

Tabla 8. Comparativa de resultados

Parámetro	Caso de estudio	(Kanathipan & Lam, 2022)	(Shen, Zakzewski, Hasnain, Resalayyan, & Khaligh, 2023)
Energía en el enlace (J)	1.323	2.275	2.64
Potencia (W), voltaje de salida (V)	200, 210	220, 220	200, 200
Número de dispositivos de conmutación utilizados	10 (1 diodo y 9 MOSFETs)	10 (6 diodos y 4 MOSFETs)	16 (2 diodos y 14 MOSFETs)
Eficiencia (%)	94	94	96
Tamaño de los elementos pasivos para desacoplar la potencia	4 capacitores de 15 μF	2 capacitores de 47 µF	4 capacitores de 33 µF

6. REFERENCIAS

Abdulrazzaq, Ali, & System, D. (2018). Efficiency performances of two MPPT algorithms for PV system with different solar panels irradiances. 9(4), 1755-1764.

Aberoumand, S., Woodfield, P., Shabani, B., & Dao, (2020). Advances in electrode and electrolyte improvements in vanadium redox flow batteries with a focus on the nanofluidic electrolyte approach. 881, 1-49.

Afridi, K. K., Chen, M., & Perreault, D. (2013). Enhanced bipolar stacked switched capacitor energy buffers. 50(2), 1141-1149.

Batra, S., Pandav, C. S., Ahuja, S., & Research, D. (2019). Light Emitting Diode Lighting Flicker, its Impact on Health, and the Need to Minimise it. 13(5).

Chen, M., Afridi, K. K., & Perreault, D. (2013). Stacked switched capacitor energy buffer architecture. 28(11), 5183-5195.

Fan, S., Xue, Y., & Zhang, K. (2012). A novel active power decoupling method for single-phase photovoltaic or energy storage applications. Paper presented at the 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).

Isik, S., Alharbi, M., & Bhattacharya, S. (2021). An optimized circulating current control method based on PR and PI controller for MMC applications. 57(5), 5074-5085.

Kanathipan, K., & Lam, J. (2022). An Electrolytic Capacitor-Less PV Micro-Inverter Based on CLL Resonant Conversion with a Power Control Scheme Using Resonant Circuit Voltage Control Loops. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 7(2), 139-149.

Kumar, M., Panda, K. P., Rosas-Caro, J. C., Valderrabano-Gonzalez, A., & Panda, G. (2023). Comprehensive review of conventional and emerging maximum power point tracking algorithms for uniformly and

ISSN: 2992-8338

partially shaded solar photovoltaic systems. IEEE Access.

Liu, Y., Zhang, W., Sun, Y., Su, M., Xu, G., & Dan, H. (2021). Review and comparison of control strategies in active power decoupling. IEEE Transactions on Power Electronics, 36(12), 14436-14455.

McHugh, C., Sinha, S., Meyer, J., Pervaiz, S., Lu, J., Zhang, F. Kumar, A. (2016). A high power density single-phase inverter using stacked switched capacitor energy buffer. Paper presented at the 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).

Pan, X., Li, H., Liu, Y., Zhao, T., Ju, C., & Rathore, A. (2019). An overview and comprehensive comparative evaluation of current-fed-isolated-bidirectional DC/DC converter. 35(3), 2737-2763.

Rodríguez-Benítez, O., Ponce-Silva, M., Aqui-Tapia, J. A., Rodríguez-Benítez, Ó. M., Lozoya-Ponce, R. E., & Adamas-Pérez, H. (2023). Active Power-Decoupling Methods for Photovoltaic-Connected Applications: An Overview. Processes, 11(6), 1808.

Shen, Y., Zakzewski, D., Hasnain, A., Resalayyan, R., & Khaligh, A. (2023). Sensorless Control for DC-Parallel Active Power Decoupling in PV Microinverters. IEEE Transactions on Power Electronics.

Shukir, S. S. (2021). Solar System Inverters Types. Journal of Advance in Electrical Device, 24-31.

Simon, P., & Gogotsi, Y. (2020). Perspectives for electrochemical capacitors and related devices. 19(11), 1151-1163.

Sun, J., Luo, B., & Li, H. (2022). A review on the conventional capacitors, supercapacitors, and emerging hybrid ion capacitors: past, present, and future. Advanced Energy and Sustainability Research, 3(6), 2100191.

Sun, Y., Liu, Y., Su, M., Xiong, W., & Yang, J. (2015). Review of active power decoupling topologies in single-phase systems. IEEE Transactions on Power Electronics, 31(7), 4778-4794.

Zhang, J., Ding, H., Wang, B., Guo, X., & Padmanaban, S. (2019). Active power decoupling for current source converters: An overview scenario. Electronics, 8(2), 197.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Bladeless wind turbines, a clean energy generation alternative.

A. Almaraz-Martinez*, Jorge Colin-Ocampo*, Arturo Abúndez-Pliego*, H. Andrés-Mauricio*, D. Navarrete-Parada*, Andrés C. Rodríguez*.

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos , C.P. 62490 México. m23ce136@cenidet.tecnm.mx*

Abstract: Currently, the generation of electrical energy from alternative and environmentally friendly sources is in constant development. Wind energy is one of the most important sources of electric power. For this reason, a new alternative for clean energy generation based on the phenomenon of vortex-induced vibrations is been explored. Taking advantage of this phenomenon, a new type of wind turbine, the bladeless wind turbine, has been developed. In this paper, a review and compilation of research addressed on bladeless wind turbines is presented. Through this review four approaches were clearly identified: the fluid-structure interaction of the bladeless wind turbine by means of CFD, finite element modeling and analysis, experimental prototypes and, finally several models and analyses that integrate different approaches for the development of bladeless wind turbines. It was also found that most of the reported works are focused on CFD technique, while with less frequency there are works on experimental techniques.

Keywords: Wind energy, vortex induced vibrations, bladeless wind turbine, CFD, finite element.

1. INTRODUCCION

Actualmente los problemas ambientales son cada vez más graves, a causa de la quema de petróleo y carbón, lo cual genera daños de gran impacto en la naturaleza (Hao *et al.*, 2022; Pandey *et al.*, 2021; Rezaei *et al.*, 2023; Tan *et al.*, 2023)). Por lo que la generación de energía limpia y de bajo impacto ambiental a partir de métodos alternativos se encuentra en un punto crítico de investigación. La energía eólica, al ser una de las principales fuentes de generación de energía renovable, representa una alternativa de gran impacto. A partir de este enfoque, se ha propuesto aprovechar el fenómeno de las vibraciones inducidas por vórtices (VIV, por sus siglas en inglés), el cual se produce por la interacción de fluido-estructura. El flujo de viento o agua que pasa por la superficie de un sólido da como este resultado el desprendimiento de vórtices lo que provoca que comience a oscilar. Este fenómeno se presenta comúnmente en estructuras delgadas y de cuerpo circular como lo son cables, tuberías, estructuras marinas o edificios por mencionar algunos (Facchinetti et al., 2004; Mathelin y De Langre, 2005; Williamson y Govardhan, 2008). Con base a este fenómeno, la empresa española Vortex Bladeless dirigida por Jesús Villarreal (Jesús Villarreal, 2018.) propuso y desarrolló la tecnología de los aerogeneradores sin aspas (BWT, por sus siglas en inglés), ver en la Figura 1, los cuales transforman la energía mecánica generada por las VIV en energía eléctrica. Las ventajas que posee esta nueva tecnología se encuentra su estructura simple, debido a que no se requiere una gran cantidad de componentes para su implementación, por ende, sus costos de mantenimiento son menores y generan una menor cantidad de ruido en comparación a un aerogenerador tradicional. Younis *et al.* (Younis *et al.*, 2022) propusieron y desarrollaron un diseño del aerogenerador sin aspas compuesto de una base, un mástil hueco y una varilla elástica. Realizaron modelos y simulaciones para diferentes geometrías del mástil y experimentalmente identificaron el ángulo ideal del mástil. Siguiendo la misma línea de investigación, Elsayed y Farghaly. (Elsayed y Farghaly, 2022) presentaron un modelo matemático para el análisis del trabajo del BWT, del cual diseñaron un prototipo.

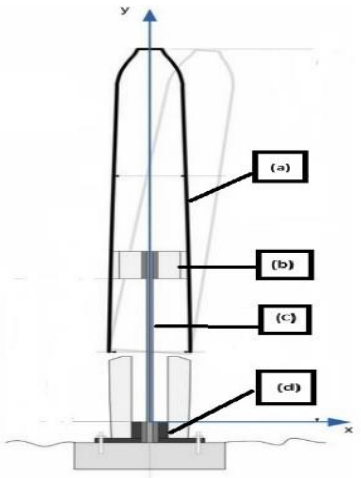


Figura 1 Esquema del BWT propuesto por Vortex Bladeless, formado por: (a) cuerpo del mástil, (b) alternador sintonizado, (c) mástil y (d) base.(Jesús Villarreal, 2018)

Demostraron que el modelo matemático se puede aplicar para el estudio del desempeño del BWT para una velocidad del viento baja. Por el contrario, Aballe *et al*. (Aballe *et al.*, 2020) desarrollaron y construyeron un prototipo de BWT con un mecanismo de resorte para maximizar la cantidad de viento que puede recolectar usando dos generadores lineales diseñados para admitir cualquier ángulo de movimiento desde

ISSN: 2992-8338

el plano horizontal. Por otra parte, González-González *et al*. (González-González *et al.*, 2024) realizaron una solución para la configuración mejorada en el diseño del BWT con el propósito de aumentar la producción de energía mediante la evaluación de la influencia de la geometría en el rango de operación , conocido como *lock-in*. Los resultados señalaron que la variación en la geometría puede cambiar el rango de bloqueo a diferentes Números de Reynolds, resaltando el impacto mínimo de la rugosidad. Por otra parte, Chizfahm *et al*(Chizfahm *et al.*, 2018) estudiaron el modelado dinámico de cuatro configuraciones para el BWT en donde variaron la geometría del cuerpo del mástil y el tipo de soporte flexible en donde se montó y reportaron que el cuerpo de mástil cónico y cilindro circular recto exhibieron un mejor desempeño en las zonas de sincronización y presincronización, respectivamente. Partiendo de los modelos y prototipos del BWT , Bardakjian *et al*. (Bardakjian *et al.*, 2017) elaboraron un estudio para determinar si los BWT son más eficientes que los aerogeneradores de eje horizontal. Con ese propósito consultaron diversos recursos académicos, con los cuales distinguieron que los aerogeneradores de eje horizontal son aún más eficientes al producir más energía a velocidades del viento más baja en comparación a los aerogeneradores sin aspas a causa de la relación entre el uso y la producción de energía que es aproximadamente 80% para el aerogenerador de eje horizontal y aproximadamente el 70% para BWT. En consecuencia, Ordoez y Reyes Duke. (Ordoez y Reyes Duke, 2021) elaboraron un análisis técnico de la implementación de un BWT en la ciudad de Puerto Cortes, Honduras. Para este análisis emplearon un aerogenerador sin aspas Vortex NANO, del cual desarrollaron proyecciones para la posterior implementación de un BWT Vortex Tacoma en las mismas condiciones.

En este trabajo se reporta una recopilación de los trabajos realizados desde 2018 hasta la fecha, sobre los BWT (Aerogeneradores BWT), los cuales pueden clasificarse en: la dinámica de fluidos computacional, elemento finito, experimental y, por último, el análisis y modelado que combinan otros enfoques menos desarrollados. La recopilación mostró que la mayoría de los trabajos se enfocan en la técnica de CFD , como se observa en la Tabla 1 , mientras que con menor frecuencia se encuentran trabajos sobre técnicas experimentales, debido a la complejidad de preparar bancos experimentales.

Tabla 1 Trabajos reportados en la literatura sobre BWT.

Enfoque	CFD	FEA	Experimental	Otros
Cantidad	8	5	4	5

2. MODELADO DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR VÓRTICES (VIV´S):

2.1 Vibraciones inducidas por vórtices.

Rostami y Armandei. (Rostami y Armandei, 2017) describieron el fenómeno de las VIV´s de tal manera que se producen cuando el flujo de viento o agua interacciona con un sólido, el flujo se separa de la superficie del sólido y se genera una estela de vórtices. En cada lado del sólido, se generan dos vórtices que invierten su posición de manera periódica. Este desprendimiento de vórtices distribuye asimétricamente la presión alrededor del sólido, provocando fuerzas periódicas y en consecuencia una vibración en el sólido, como se ilustra en la Figura 2.

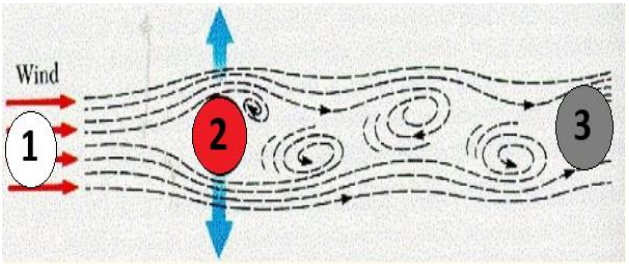


Figura 2 Representación de la generación de la estela de vórtices , donde: (1) es el flujo que entra en contacto con el sólido, (2) el flujo se separa y genera un vórtice en cada de uno de los lados del sólido, y (3) es la estela de vórtices que se genera y que provoca la oscilación del sólido. (Rostami y Armandei, 2017)

Al aumentar la velocidad del flujo, la frecuencia de desprendimiento de vórtices aumenta también. Cuando La frecuencia de desprendimiento de vórtices se acerca a la frecuencia natural del sólido, el cuerpo del solido oscila en el régimen de resonancia. A la resonancia producida por las VIV´s se le conoce como *lock-in*

2.2 Acoplamiento de osciladores

Para describir el comportamiento de las VIV en estructuras , se ha tomado como referencia el modelo matemático propuesto por Facchinetti *et al* (Facchinetti, *et al*., 2004) En este modelo se considera un cilindro circular de un grado de libertad, el cual oscila transversalmente por un flujo de viento o agua a una velocidad constante, esto queda representado en la Figura 3.

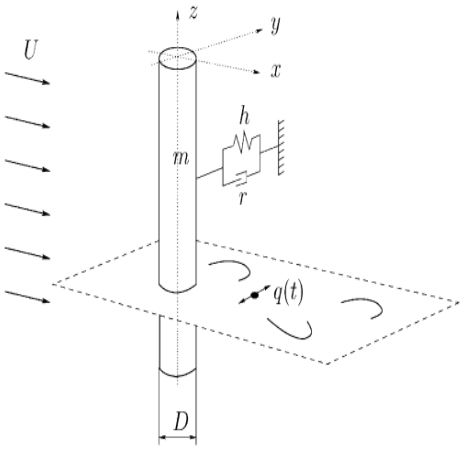


Figura 3 Modelo de un cilindro de un grado de libertad integrado por: (m) la estructura del cilindro, (D) el diámetro del cilindro, (h) la rigidez de la estructura, (r) el amortiguamiento de la estructura, (U) el flujo de viento o agua y (q(t)) es la estela de vórtices generada por la interacción del fluido con la estructura (Facchinetti, *et al*., 2004)

ISSN: 2992-8338

El desplazamiento de la estructura, también llamado oscilador lineal, queda descrito por la siguiente ecuación:

$$m\ddot{Y} + r\dot{Y} + hY = S \quad (1)$$

Donde:
Y es la oscilación en la dirección transversal
m es la masa total de la estructura y el fluido circundante.
r es el amortiguamiento, que considera tanto las disipaciones viscosas en el soporte como el amortiguamiento agregado del fluido.
h representa la rigidez externa de la estructura.
S es el término de excitación que modela los efectos de los vórtices en la estructura.

Después de un proceso de adimensionamiento con respecto a la masa, la ecuación (1) de movimiento de la estructura queda en la siguiente forma:

$$\ddot{y} + \left(2\xi\delta + \frac{\gamma}{\mu}\right)\dot{y} + \delta^2 y = s \quad (2)$$

Donde:
ξ es la relación de amortiguamiento del sistema secundario.
δ es la relación de frecuencias fluido-estructura del sistema principal y la frecuencia de desprendimiento de vórtices.
γ es el parámetro de estancamiento
μ es la relación de la masa de la estructura y del fluido.
s corresponde a la fuerza de excitación.

Para el modelado del comportamiento de la estela, se utiliza un oscilador no lineal que satisface a la ecuación de Van der Pool, que también pasa por un proceso de adimensionamiento, (ecuación (3)).

$$\ddot{q} + \varepsilon\Omega_f(q^2 - 1)\dot{q} + \Omega_f^2 q = F \quad (3)$$

Donde:
q es el coeficiente de sustentación fluctuante en la estructura.
F es el modelo los efectos del movimiento del cilindro en la estela.
ε es el parámetro de no linealidad.
Ω_f es la frecuencia de desprendimiento de vórtices

El sistema fluido-estructura queda acoplado a partir de la ecuación (2) y (3) . La fuerza que actúa en el oscilador de estela en la ecuación (3) se describe dependiendo del modelo de acoplamiento:(a) desplazamiento, (b) velocidad y (c) aceleración, como se muestra en la ecuación (4).

$$\text{(a)} \quad f = Ay_0\cos(\omega t)$$
$$\text{(b)} \quad f = -A\omega y_0 Sen(\omega t) \quad (4)$$
$$\text{(c)} \quad f = -A\omega^2 y_0\cos(\omega t)$$

Donde:
t es el tiempo adimensional
ω es la frecuencia angular
A es la fuerza de acoplamiento
y_0 es la magnitud de la fuerza de excitación
f es relación de frecuencias naturales

3. ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LOS SISTEMAS VIV'S PARA LOS BWT.

3.1 Enfoque de dinámica de fluidos computacional.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) se aplica ampliamente en diversas áreas de la ingeniería, desde la aeroespacial hasta la biomédica. En resumen, la CFD emplea modelos matemáticos y técnicas computacionales para simular y analizar el comportamiento de fluidos tales como el aire y el agua en diferentes condiciones. Esto nos permite prever cómo se comportará un fluido en un entorno específico. A continuación, se recopilaron trabajos que aplicaron la CFD para el análisis de los BWT.
Manshadi *et al.* (Manshadi *et al.*, 2021) centraron su investigación en la mejora de la potencia eléctrica generada por el BWT mediante la simulación de las interacciones fluido-estructura. Usaron el método de memoria a corto plazo (LSTM) para la reducir los tiempos de cálculo. Obtuvieron que la relación matemática de la potencia de salida extiende los diferentes tamaños del BWT con una amplia gama de variaciones de parámetros. Por otro lado, Saengsaen *et al.* (Saengsaen *et al.*, 2019) examinaron el patrón de flujo y las características de dos BWT que se encuentran en el mismo campo de flujo. También evaluaron la fuerza de sustentación adicional generada por el sistema a partir de una simulación CFD 2-D. Obtuvieron que, en el caso de un BWT en el campo de flujo, produce un coeficiente de elevación de 0.851 en comparación con dos BWT en el mismo campo de flujo, mostraron mayores coeficientes de sustentación de 0.893 y 1.841, respectivamente reportaron que la generación de energía del sistema de dos BWT es mayor al de un solo BWT. Por otra parte, Kaviti y Thakur. (Kaviti y Thakur, 2022) desarrollaron un modelo 3D del BWT ocupando el software CATIA y para el análisis CFD usaron el software Ansys Fluent. Obtuvieron que la velocidad adecuada para la estela de vórtices de Von Karman es de 2.0 m/s. y la frecuencia simulada en la cual se produce energía eléctrica fue de 8.5 Hz. También Sabab y Mohd. (Sabab y Mohd, 2021) diseñaron dos modelos de BWT en 2D y 3D, mediante el uso del software SolidWorks y para el análisis CFD emplearon el software Ansys Fluent. En los dos diseños 3D del BWT se modificaron el diámetro y la altura del mástil en cinco configuraciones. La configuración mejorada del BWT consiste en el diámetro de 1.0 m y una altura de 7.5 m, que permite al BWT alcanzar el fenómeno de *lock-in* más rápido a diferencia de los otros diseños propuestos. Asimismo, Francis *et al*. (Francis *et al.*, 2022) su investigación se enfocó en dos estudios: al análisis del patrón de vórtices que genera un BWT y el análisis de su coeficiente de elevación. Para ello diseñaron y modelaron un BWT basándose en un ángulo de semi-vortice, utilizando el software Solid Edge y en el análisis CFD usaron el software Simscale, en la Figura 4 se representan las diferentes vorticidades que obtuvieron en la simulación. Concluyeron que el diseño mejorado para el BWT es el mástil cónico, el cual es el adecuado para la generación de energía a baja velocidad del viento. Por otra parte, Alnounou y Samantaray. (Alnounou y Samantaray, 2023) hicieron un modelo numérico

ISSN: 2992-8338

del flujo de aire que interactúa alrededor de un cilindro bidimensional y tridimensional del cual, posteriormente, realizaron un estudio en el cual cambiaron los ángulos de inclinación del cilindro de cinco formas diferentes, para asegurarse de la exactitud del modelo. De los resultados, señalaron que al aumentar el ángulo de inclinación del cilindro se logra una menor caída de presión.

Finalmente, Cajas *et al*. (Cajas *et al.,* 2020) adecuaron el código Alya para la realización de simulaciones del problema de interacción Fluido-Estructura y su posterior comparación con los resultados experimentales. La simulación realizada se basa en el enfoque de acoplamiento de códigos múltiples con un algoritmo de acoplamiento flexible.

En la comparación entre los resultados numéricos y experimentales proporcionados por la PYME, consiguieron que los errores relativos fueran inferiores al 10.

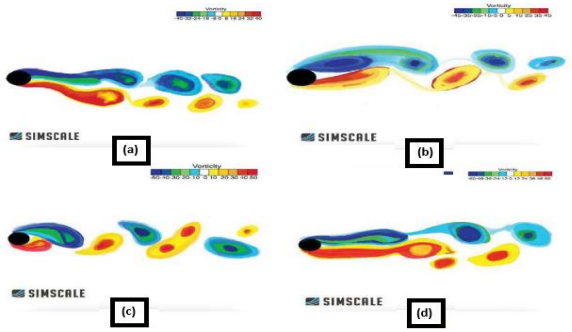


Figura 4 Estela de vórtices obtenidos del análisis CFD de los modelos de BTW propuestos: (a) modelo 1 mástil cilíndrico con conicidad uniforme, (b) modelo 2 mástil cilíndrico con conicidad no uniforme , (c) modelo 3 mástil cónico con cono uniforme y (d) modelo 4 mástil cónico con cono no uniforme . (Francis *et al*., 2022)

3.2 Enfoque de Elemento Finito

Badri *et al*. (Badri *et al.*, 2023) realizaron el modelo de un aerogenerador sin aspas, con el objetivo de aumentar las vibraciones del aerogenerador mediante la variación de las dimensiones del diseño del mástil y de la base, ver la Figura 5. Para su análisis utilizaron el software ANSYS reportando que la máxima deflexión del mástil fue de 0.22775 m sometido a una aceleración de 10 m/s^2. Por otra parte, Yadav *et al*. (Yadav *et al.*, 2021), tuvieron el objetivo de aumentar el rendimiento y reducir el peso del BWT. Para ello, usaron el software SolidWorks para el diseño del BTW, en cual añadieron aletas expandibles en el mástil del BWT y ocuparon fibra de vidrio y fibra de carbono. Para el análisis del modelo del BWT, de igual forma que Badri *et al* ocuparon el software ANSYS. De los resultados del análisis del BWT, comprobaron que la fibra de carbono es un componente seguro para implementar debido a su alta resistencia y que redujo un 30.93% la masa del BWT en comparación con una turbina convencional de un tamaño similar. La adicción de aletas al mástil mejoró la producción de vórtices, provocando una mayor oscilación del mástil y por consecuencia aumentó la producción de energía eléctrica. Igualmente, Francis *et al*.(Francis *et al.*, 2021) diseñaron y analizaron un BWT con el objetivo de intentar incrementar la deflexión del BWT. De manera semejante a Yadav *et al* y Badri *et al*, modelaron el BWT con el uso del software SolidWorks e implementaron los la fibra de carbono y fibra de vidrio para su análisis. De igual forma, utilizaron el software ANSYS para el análisis de su modelo de BTW. Concluyeron que la fibra de vidrio es mejor que la fibra de carbono en términos de amplitud de oscilación, por lo que es un mejor material para implementar en el BWT.

También, Asre *et al*. (Asre *et al.*, 2022) y Sudarshan *et al* .(Sudarshan *et al.*, 2023) modelaron y analizaron un BWT para que el modelo sea portátil y pueda ser implementado en cualquier lugar. Para ello y a diferencia de Yadav *et al* y Francis *et al*, fue empleado el software CATIA para el desarrollo del modelo 3D del BWT, pero de igual forma que ellos, el software ANSYS se ocupó para el análisis de Elemento Finito del BWT. Concluyeron a partir del modelado y las simulaciones del BWT, es posible transportar e instalar un BWT en cualquier lugar con suficiente flujo de viento.

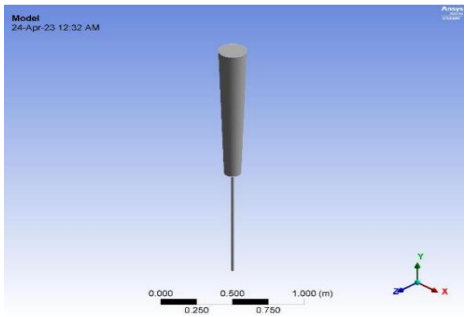


Figura 5 Modelo final del BWT usado para el análisis en ANSYS. (Badri *et al*., 2023)

3.3 Enfoque Experimental

Thomai *et al*. (Thomai *et al.*, 2019) estudiaron cuatro diferentes tipos de geometrías para el BWT. En la Figura 6 se muestran los modelos experimentales. Los mástiles fueron elaborados con fibra de carbono. Después de las pruebas experimentales, concluyeron que el diseño del mástil rectangular cónico uniforme es el más adecuado para recolectar más energía. Después, Faris *et al*. (Faris *et al.,* 2020.) realizaron pruebas numéricas y experimentales de un BWT, plantearon el diseño de una estructura cilíndrica que oscila en un extenso rango de velocidades y direcciones del viento, lo que maximiza la recolección de energía. Para el análisis de interacción del fluido-estructura, se realizaron pruebas numéricas para definir la respuesta dinámica del BWT en diferentes condiciones de flujo de aire.

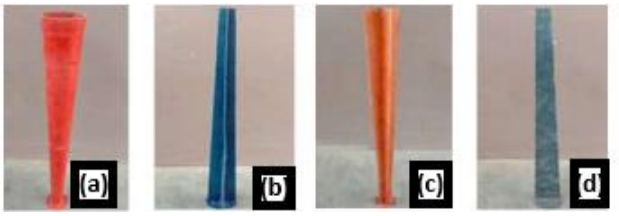


Figura 6 Modelos físicos de los diseños de la geometría del BWT propuestos: (a) mástil cónico hueco uniforme, (b) con sección trasversal cónico uniforme, (c) cónico inverso uniforme y (d) con sección transversal rectangular simple y cónica uniforme. (Thomai *et al*., 2019)

ISSN: 2992-8338

3.4 Análisis y modelados utilizando otros enfoques.

Aher *et al*. (Aher *et al.*, 2021) investigaron la forma de mantener el voltaje y la corriente en sus valores máximos de un BWT independientemente del entorno en el que se encuentre, con ese propósito, usaron el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) para una red neuronal artificial (RNA, por sus siglas en inglés). El cual fue implementado para alimentar de energía un motor de inducción monofásico, para el bombeo de agua. Por otra parte, Bahadur, (Bahadur, 2022) analizaron un BWT al que le implementaron un mecanismo de sintonización. El mecanismo sintonizable está formado por un resorte de velocidad progresiva unido a un imán oscilante que se encuentra dentro de una bobina electromagnética. En la Figura 7 se muestra el esquema del mecanismo sintonizable.

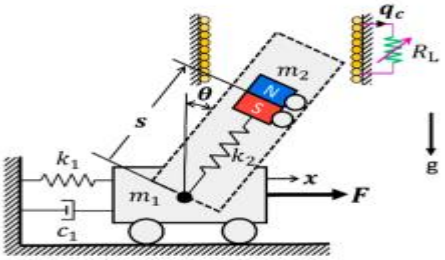


Figura 7 Modelo de masa concentrada equivalente sintonizable propuesta por Bahadur. (Bahadur, 2022)

Las ecuaciones de movimiento no lineales acopladas se desarrollaron utilizando la representación de masa concentrada y la formulación de Lagrange. De las pruebas numéricas, los resultados muestran que el BWT sintonizable funciona de manera eficaz más allá de un rango de velocidad de viento. Los resultados analíticos concuerdan con las pruebas numéricas, lo que significa que, a una velocidad del viento determinada, el BWT sintonizable tiene una rigidez elástica idónea en la que la potencia de salida es máxima. Al contrario, Maftouni *et al*.(Maftouni *et al*., 2021.) estudiaron los efectos de la fuerza de arrastre sobre la frecuencia del mástil de un BWT. Se realizaron simulaciones numéricas de un cilindro con sección transversal semicircular con flujo transversal para dos casos diferentes: para cilindros oscilantes controlados y no controlados. De los resultados, concluyeron que, al implementar un sistema de control en los BWT, se puede regular en gran medida las oscilaciones y aumentar el valor de la frecuencia del sistema, limitando su amplitud de vibración. En cambio, Adeyanju y Boucher (Adeyanju y Boucher, 2020) diseñaron un BWT que incorpora un soporte estructural a una distancia desplazada del eje central del mástil cilíndrico. Mediante el uso del software Matlab, realizaron el análisis de la ecuación de movimiento derivada del dispositivo y observaron en los resultados que para velocidades del viento por encima y por debajo de la velocidad de 4 m/s, la velocidad angular permaneció igual. Las amplitudes de oscilación altas del BWT solo ocurren en la resonancia. Finalmente, Gohate *et al*. (Gohate *et al.*, 2016) analizaron el alcance y la viabilidad del BWT con respecto al aerogenerador tradicional, para ello propusieron el diseño de un BWT con geometría en el mástil cónico. Modificaron la longitud del mástil y adquirieron datos de la potencia mecánica para cada una de las longitudes del mástil que usaron. Con esto concluyeron que la captación de energía esta función de las diferentes geometrías del cilindro.

4. CONCLUSIONES.

En este trabajo se reporta una recopilación de los trabajos realizados desde 2018 hasta la fecha, sobre los Aerogeneradores sin aspas. Se encontró que los BWT están aún en fase de desarrollo, debido a que no se encuentran de manera comercial debido a sus principales limitaciones siendo: su sistema de sintonización y el rango limitado de velocidades del viento en los que trabaja, sin embargo, las ventajas que presentan los BWT son :

1) Al no contar con ejes mecánicos, su mantenimiento es más sencillo de realizar y de menor costo.
2) Su vida útil es mayor, debido a sus componentes no son susceptibles al desgaste por fricción.
3) Se requiere de un menor espacio para su implementación.

La mayoría de los trabajos recopilados usando la técnica de CFD, concluyeron que el BWT a velocidades del viento bajas, opera de manera estable. Por otro lado en menor frecuencia se encuentran trabajos sobre técnicas experimentales, debido a la complejidad de preparar bancos experimentales. En cuanto a los trabajos de elemento finito, concluyeron que la fibra de carbono y la fibra de vidrio son componentes seguros, al implementarlos resuden el peso del BWT y el rango de oscilación del aumenta.

REFERENCIAS

Aballe, A.B.D., Cruz, K.Y.C., Rosa, V.J.H.D., Magwili, G. V. and Ostia, C.F. (2020), "Development of a Linear Generator with Spring Mechanism for Vortex Bladeless Wind Turbine", *2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, HNICEM 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., doi: 10.1109/HNICEM51456.2020.9399999.

Adeyanju, A.A. and Boucher, D. (2020), "Theoretical Analysis of the Bladeless Wind Turbine Performance", *Journal of Scientific Research and Reports*, Sciencedomain International, pp. 93–106, doi: 10.9734/jsrr/2020/v26i1030325.

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*, Elsevier BV, Vol. 2 No. 2, pp. 584–588, doi: 10.1016/j.gltp.2021.08.054.

Alnounou, M.A. and Samantaray, S. (2023), "Article Type: Review Article", *Medicon Engineering Themes*, Vol. 4.

Asre, C.M., Kurkute, V.K. and Kanu, N.J. (2022), "Power generation with the application of vortex wind turbine", *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Vol. 56, pp. 2428–2436, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.228.

Badri, N., Peddolla, V., Gottumukkala, H., Jyothi, U.S. and Aparna, S. (2023), "Design and Analysis of Bladeless Wind Turbine", *E3S Web of Conferences*, Vol. 391, EDP Sciences, doi: 10.1051/e3sconf/202339101040.

Bahadur, I. (2022), "Dynamic Modeling and Investigation of a Tunable Vortex Bladeless Wind Turbine", *Energies*, MDPI, Vol. 15 No. 18, doi: 10.3390/en15186773.

Bardakjian, A.T., Mandadakis, P.P. and Tingle, A. (2017), "Efficiency comparison of horizontal axis wind turbines and bladeless turbines", *PAM Review Energy Science & Technology*, University of Technology, Sydney (UTS), Vol. 4, pp. 59–75, doi: 10.5130/pamr.v4i0.1461.

Cajas, J.C., Houzeaux, G., Yáñez, D.J. and Mier-Torrecilla, M. (2020). *Partnership for Advanced Computing in Europe SHAPE Project*

ISSN: 2992-8338

Vortex Bladeless: Parallel Multi-Code Coupling for Fluid-Structure Interaction in Wind Energy Generation.

Chizfahm, A., Yazdi, E.A. and Eghtesad, M. (2018), "Dynamic modeling of vortex induced vibration wind turbines", *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 121, pp. 632–643, doi: 10.1016/j.renene.2018.01.038.

Elsayed, A.M. and Farghaly, M.B. (2022), "Theoretical and numerical analysis of vortex bladeless wind turbines", *Wind Engineering*, SAGE Publications Inc., Vol. 46 No. 5, pp. 1408–1426, doi: 10.1177/0309524X221080468.

Facchinetti, M.L., De Langre, E. and Biolley, F. (2004), "Vortex-induced travelling waves along a cable", *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, Vol. 23, Elsevier BV, pp. 199–208, doi: 10.1016/j.euromechflu.2003.04.004.

Faris, K.N., Naiem, A., Hesham, S. and Abdelnaby, M.A. (2020). *Numerical and Experimental Investigations of Bladeless Wind Turbine for Green Energy Applications*, *MSA ENGINEERING JOURNAL*, Vol. 2.

Francis, S., Umesh, V., Jangam, S., Shivakumar, S., Santhosh, N., Shankar, G., Razak, A., *et al.* (2022), "Modelling and CFD simulation of vortex bladeless wind turbine", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2421, American Institute of Physics Inc., doi: 10.1063/5.0076790.

Francis, S., Umesh, V. and Shivakumar, S. (2021), "Design and Analysis of Vortex Bladeless Wind Turbine", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, Elsevier Ltd, pp. 5584–5588, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.469.

Gohate, G., Bobde, S., Khairkar, A. and Jadhav, S. (2016), "Study of Vortex Induced Vibrations for Harvesting Energy", *IJIRST-International Journal for Innovative Research in Science & Technology*|, Vol. 2 No. 11.

González-González, E., Yáñez, D.J., Del Pozo, S. and Lagüela, S. (2024), "Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations", *Applied Sciences*, Vol. 14 No. 7, p. 2815, doi: 10.3390/app14072815.

Hao, Y., Guo, Y., Li, S., Luo, S., Jiang, X., Shen, Z. and Wu, H. (2022), "Towards achieving the sustainable development goal of industry: How does industrial agglomeration affect air pollution?", *Innovation and Green Development*, Elsevier B.V., Vol. 1 No. 1, doi: 10.1016/j.igd.2022.100003.

Jesús, D. and Villarreal (2018). *Aerogeneradores Resonantes Por VIV*.

Kaviti, A.K. and Thakur, A.K. (2022), "Power Generation from Wind Using Bladeless Turbine", *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 139–146, doi: 10.1007/978-981-16-3132-0_14.

Maftouni, N., Dehghan Manshadi, M. and Milad Mousavi, S. (2021). *The Effect of Drag Force on The Body Frequencies and The Power Spectrum of a Bladeless Wind Turbine*.

Manshadi, M.D., Ghassemi, M., Mousavi, S.M., Mosavi, A.H. and Kovacs, L. (2021), "Predicting the parameters of vortex bladeless wind turbine using deep learning method of long short-term memory", *Energies*, MDPI AG, Vol. 14 No. 16, doi: 10.3390/en14164867.

Mathelin, L. and De Langre, E. (2005), "Vortex-induced vibrations and waves under shear flow with a wake oscillator model", *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, Elsevier BV, Vol. 24 No. 4, pp. 478–490, doi: 10.1016/j.euromechflu.2004.12.005.

Ordoez, O. and Reyes Duke, A. (2021), "Wind Resource Assessment: Analysis of the Vortex Bladeless Characteristics in Puerto Cortés, Honduras", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 801, IOP Publishing Ltd, doi: 10.1088/1755-1315/801/1/012019.

Pandey, A., Brauer, M., Cropper, M.L., Balakrishnan, K., Mathur, P., Dey, S., Turkgulu, B., *et al.* (2021), "Health and economic impact of air pollution in the states of India: the Global Burden of Disease Study 2019", *The Lancet Planetary Health*, Elsevier B.V., Vol. 5 No. 1, pp. e25–e38, doi: 10.1016/S2542-5196(20)30298-9.

Rezaei, N., Larijani, B., Farzadfar, F., Mokdad, A.H., Naghavi, M., L Murray, C.J., Farzadfar, F., *et al.* (2023), *Effect of Air Pollution on Disease Burden, Mortality, and Life Expectancy in North Africa and the Middle East: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2019*, *Articles Lancet Planet Health*.

Rostami, A.B. and Armandei, M. (2017), "Renewable energy harvesting by vortex-induced motions: Review and benchmarking of technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, 1 April, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.202.

Sabab, M.W. and Mohd, S. (2021), "Aerodynamic Characteristic Of Vortex Bladeless Wind Turbine: A Short Review", *RESEARCH PROGRESS IN MECHANICAL AND MANUFACTURING ENGINEERING*, Vol. 2 No. 1, pp. 183–192, doi: 10.30880/rpmme.2021.02.01.021.

Saengsaen, S., Chantharasenawong, C. and Wu, T.-L. (2019), "A 2–D Mathematical Model of Vortex Induced Vibration Driven Bladeless Wind Turbine", *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Vol. 291, p. 02007, doi: 10.1051/matecconf/201929102007.

Sudarshan, T.A., Bhavya, P., Manjesh, B.C., Kavithanjan, K., Akash Krishna, R., Mahantesh, D. and Vakayil, J. (2023), "A renovative design and fabrication of vortex bladeless windmill", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2426, Institute of Physics, doi: 10.1088/1742-6596/2426/1/012059.

Tan, Q., Liu, F. and Li, J. (2023), "An Integrated Analysis on the Synergistic Reduction of Carbon and Pollution Emissions from China's Iron and Steel Industry", *Engineering*, Elsevier BV, doi: 10.1016/j.eng.2023.09.018.

Thomai, M.P., Kharsati, L., Samy, N.R., Sivamani, S. and Venkatesan, H. (2019), "Experimental analysis of vortex induced vibration in the bladeless small wind turbine", *ASME 2019 Gas Turbine India Conference, GTINDIA 2019*, Vol. 2, American Society of Mechanical Engineers (ASME), doi: 10.1115/GTINDIA2019-2484.

Williamson, C.H.K. and Govardhan, R. (2008), "A brief review of recent results in vortex-induced vibrations", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96 No. 6–7, pp. 713–735, doi: 10.1016/j.jweia.2007.06.019.

Yadav, R., Pokharel, B., Poudel, S. and Gupta, A. (2021), "Design and Simulation of Vortex Bladeless an Attachable Fin that Harvest Energy Using Piezoelectric Technology", *2021 International Conference on Simulation, Automation and Smart Manufacturing, SASM 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., doi: 10.1109/SASM51857.2021.9841123.

Younis, A., Dong, Z., ElBadawy, M., AlAnazi, A., Salem, H. and AlAwadhi, A. (2022), "Design and Development of Bladeless Vibration-Based Piezoelectric Energy–Harvesting Wind Turbine", *Applied Sciences (Switzerland)*, MDPI, Vol. 12 No. 15, doi: 10.3390/app12157769.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Bladeless Hydro Generators Sustainable Electric Power

H. Andres-Mauricio*, Arturo Abúndez-Pliego*, Jorge Colin-Ocampo*, A. Almaraz-Martínez*, Andrés C. Rodríguez*, D. Navarrete-Parada*

**Tecnológico Nacional de México/ CENIDET.*

Int. Internado Palmira, Cuernavaca, Morelos. C.P. 62490.
Mex. Tel: (+52) 7773627770; e-mail: m23ce137@cenidet.tecnm.mx .

Abstract: The hydrokinetic power of both the ocean and pluvial currents represent a great potential to produce eco-friendly energy. Bladeless hydrogenerators are able to produce electricity taking advantage of the flow-induced vibrations (FIV) effect. In this paper, a collection of works reported from 2008 to 2023 in literature dealing with the generators powered by the FIV, both experimental and theoretical, which were classified as: a) modifications of the structure parameters such as rigidity, mass, damping, as well as the flow force that excites it. b) Passive Turbulence Control (PTC) through the modification of the hydrogenerator surface by adding rough strips or slots. Through the classification of the works, it was found that the pioneering work was reported by Bernitsas in 2008, who proposed the first hydrogenerator experimentally tested known as VIVACE. Most of the subsequent reported works refer to the VIVACE.

Keywords: Flow induced oscillation, Vortex induced vibration, VIVACE, Galloping, hydrokinetic energy.

1. INTRODUCCION

En la actualidad, el uso de energías no renovables se ha convertido en una preocupación global debido a su impacto ambiental negativo; por lo que se han buscado nuevas fuentes de energía amigables con el ambiente (Cajas & Ancona, 2023), por ejemplo: solar, eólica, hidráulica, entre otras, las cuales traen consigo ventajas ambientales, económicas y sociales, destacando: a) poca o nula emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes que contribuyen al cambio climático, b) reducen la necesidad de industrias extractivas en la medida que se evita el uso de combustibles fósiles, c) reducción de las tarifas en los servicios de luz, agua y gas, d) para los ayuntamientos, la reducción del costo de los servicios municipales de energía eléctrica (alumbrado público, bombeo de agua y edificios públicos) y e) la posibilidad de llevar energía eléctrica a comunidades remotas, y en la promoción del desarrollo de dichas comunidades (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

Dentro de las energías renovables que más interés ha despertado dentro de la comunidad científica es la energía oceánica o marina. Las energías renovables marinas constituyen un tipo de energía que se origina debido a los distintos procesos naturales que se presentan en este medio. Estas energías aprovechan el potencial de la energía hidro cinética de las corrientes marinas para generar energía eléctrica. A continuación, se describen algunas de estas fuentes: a) energía de las olas: se obtiene de la fuerza mecánica generada por las olas debido a la acción del viento sobre el agua, b) energía de las mareas: se aprovecha la energía cinética del agua en movimiento debido a las mareas. c) corrientes de mareas: La energía proviene de las corrientes marinas, impulsadas por la fuerza cinética del agua, d) corrientes Oceánicas: se dividen en superficiales y profundas. Las corrientes superficiales son impulsadas por vientos y mareas, mientras que las profundas se deben a cambios en la densidad del agua marina, e) conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC): Se basa en la diferencia de temperatura entre las capas superficiales y profundas del agua. Para ser viable comercialmente, se requiere una diferencia de temperatura de al menos 20°C, f) gradientes de Salinidad: Se liberan energía en forma de calor cuando se mezcla agua dulce con agua salada, como en las desembocaduras de los ríos (Cabello, 2022).

Estudios recientes (Bernitsas et al., 2008, 2009; Gu et al., 2020; Kim et al., 2021; J. H. Lee & Bernitsas, 2011; Liu & Bernitsas, 2015; Theophilus et al., 2023), han demostrado que se puede generar energía a partir del aprovechamiento de las corrientes oceánicas por medio de hidro generadores sin aspas, los cuales funcionan aprovechando las vibraciones inducidas por vórtices (*VIV*). A partir del desarrollo de sistemas llamados hidro generadores sin aspas2122, con los cuales se plantea aprovechar y ampliar el impacto de las *VIV* al trabajar bajo condiciones de resonancia y así lograr generación de energía (Bernitsas et al., 2008, 2009; Chang et al., 2011; Kim et al., 2021).

En este articulo presenta una es revisión de los trabajos relacionados con el aprovechamiento de la energía hidro cinética de corrientes acuáticas a partir de hidro generadores

ISSN: 2992-8338

VIV y con ellos generar energía limpia y amigable con el medio ambiente. Se definen los fenómenos involucrados para su funcionamiento, el modelo físico y matemático que describen su comportamiento.

Se encontraron investigaciones que se han dedicado a controlar la turbulencia del flujo que excita al sistema, para lograr estabilizar el hidro generador, a partir de la colocación de tiras rugosas nombradas Control Pasivo de Turbulencia (*PTC* por sus siglas en ingles), modificaciones físicas y variación en sus parámetros de rigidez y amortiguamiento del sistema. Por otro lado, se descubrió que esta tecnología va en constante crecimiento, sin embargo, aún sigue en desarrollo, ya que no se encontraron reportes de sistemas comerciales.

2. OSCILACIONES INDUCIDAS POR FLUJO (*FIO*)

De acuerdo a la literatura, los cuerpos solidos expuestos a un entorno que involucre un flujo de fluido están sujetos a sufrir oscilaciones alternantes causadas por un fenómeno llamada oscilaciones inducidas por flujo, las cuales pueden llegar a ser peligrosas en determinados casos (S. Rao, 2011).

Las *FIO's* se pueden dividir en dos principales tipos: a) resonancia, la cual puede generar golpeteo o vibraciones inducidas por vórtices (*VIV*), b) inestabilidad, dentro de la cual puede generar galopeo o aleteo (Kim et al., 2021) como se muestran en la Figura 1.

De acuerdo con información reportada en la literatura (Bernitsas et al., 2008, 2009; Blevins, 2001; Gharib, 1999; Williamson & Govardhan, 2004), los hidro generadores sin aspas trabajan de dos formas, con *VIV* bajo condiciones de resonancia y Galope al entrar en inestabilidad, es por esta razón que solo se hará énfasis en estos dos tipos de *FIO's*.

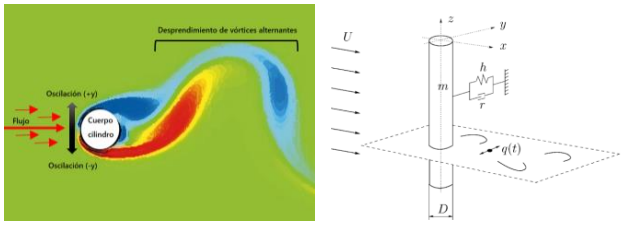


Figura 1.- Clasificación de las oscilaciones inducidas por flujo (FIO), adaptada de (Kim et al., 2021).

Las *VIV* y los golpeteos pertenecen a una familia de vibraciones forzadas. El galope y el aleteo pertenecen a una familia de vibraciones de ciclo límite. En comparación con la familia anterior, la velocidad de corte en este grupo es mayor y el rango de velocidad de operación efectiva es más amplio, lo que lleva a una mayor amplitud de respuesta bajo una velocidad de flujo más alta, lo cual es beneficioso para la recolección de energía (Wang et al., 2020).

2.1 Vibraciones inducidas por vórtices (VIV)

Las vibraciones inducidas por vórtices se originan debido a la interacción fluido-estructura y surge cuando un flujo ya sea líquido o gaseoso (agua o aire), es interceptada en su camino por una estructura (Çengel & Cimbala, 2006). Esto provoca que el fluido rodee el cuerpo por ambos lados generando así el desprendimiento de vórtices *Figura 2* y es gracias al patrón alternante del desprendimiento de estos últimos que se genera una vibración. Al tratarse de un fenómeno de alta complejidad, muchos investigadores han realizado extensos estudios para lograr caracterizar (Williamson & Govardhan, 2004; Blevins, 2001; Sarpkaya, 2004;Irawan & Raza, 2023; Y. J. Lee et al., 2019; Williamson & Govardhan, 2004b; Blevins, 2001).



a) b)

Figura 2.- a) Desprendimiento de Vórtices en estructura circular adaptada de (Williamson and Govardhan 2004) y b) Estructura cilíndrica y desprendimiento de vórtices tomada de (Facchinetti et al., 2004).

Facchinetti *et al.* (Facchinetti et al., 2004) propusieron un modelo matemático que se acopló a la ecuación de *van der Pol* con la que es posible modelar la dinámica de estela que describe la naturaleza fluctuante de la formación de vórtices y demuestra el comportamiento vibratorio de una estructura rígida al interactuar con un flujo de fluido (*Figura 2*). A continuación, se presenta el modelo matemático que describe esto:

comportamiento del oscilador

$$m\ddot{Y} + r\dot{Y} + hY = S \qquad \text{Ec.1}$$

donde:
$m = masa\ del\ oscilador$
$r = amortiguamiento\ del\ sistema$
$h = rigidez\ del\ sistema$
$Y = movimiento\ en\ direccion\ Y\ al\ flujo$

Comportamiento de la estela

$$\ddot{q} + \varepsilon\Omega_f(q^2 - 1)\dot{q} + \Omega_f^2 q = F \qquad \text{Ec.2}$$

acoplamineto del oscilador con la estela de forma adimensional

$$\ddot{y} + \left(2\xi\delta + \frac{\gamma}{\mu}\right)\dot{y} + \delta^2 y = s\,, \ddot{q} + \varepsilon(q^2 - 1)\dot{q} + q = f \qquad \text{Ec. 3}$$

2.2 Vibraciones inducidas por galope

Una estructura con sección transversal circular o no circular experimenta una fuerza de fluido que cambia con la orientación del flujo. A medida que la estructura vibra, su orientación cambia y la fuerza del fluido oscila. Si la fuerza oscilante del fluido tiende a aumentar la vibración, la estructura es aerodinámicamente inestable y puede producirse una vibración de una gran amplitud. La mayoría de los análisis de galope y aleteo utilizan la dinámica de fluidos cuasi estacionaria; es decir, se supone que la fuerza del fluido sobre la estructura está determinada únicamente por la velocidad relativa instantánea. La suposición casi estable es válida sólo

ISSN: 2992-8338

si la frecuencia de los componentes periódicos de la fuerza del fluido, asociados con la formación de vórtices o efectos de retardo de tiempo, está muy por encima de la frecuencia de vibración de la estructura, es decir, $f_s \gg f_n$ (Blevins, 2001).

3 HIDRO GENERADORES SIN ASPAS

En un inicio, los hidrogeneradores se desarrollaron para aprovechar las *VIV's*, sin embargo, se descubrió que interfiere otro fenómeno llamado Galope (Galloping en inglés), el cual surge al influir una velocidad de flujo muy alto, causando una inestabilidad en el sistema (Chang & Bernitsas, 2011), como se muestra en la Figura 3.

Bernitsas *et al.* (Bernitsas et al., 2008), en 2008, presentaron una nueva alternativa para la generación de energía limpia y renovable a partir de la integración de un nuevo concepto de estudio llamado *VIVACE* (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy en inglés) que es un dispositivo convertidor de energía, el cual trabaja con *VIV* y Galope al ser expuestos a flujo tales como olas y corrientes marinas (ver Figura 4 y Figura 5).

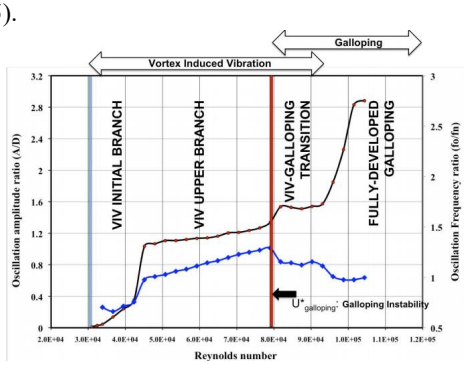


Figura 3. Transición de *VIV* a Galope, tomada de (C. Chang & Bernitsas, 2011).

El diseño del hidro generador se basa en un sistema integrado por un cilindro horizontal oscilante sujeto en sus extremos por dos resortes y dos amortiguadores, que representan las propiedades elásticas y de amortiguamiento del sistema. El sistema está montado a un marco el cual brinda estabilidad a la estructura durante su oscilación y a su vez está unido a un generador para la conversión de energía. Los hidrogeneradores *VIV* plantean el aprovechamiento de las *VIV* a partir de un amortiguamiento significativo en lugar de suprimirlas (Bernitsas et al., 2009).

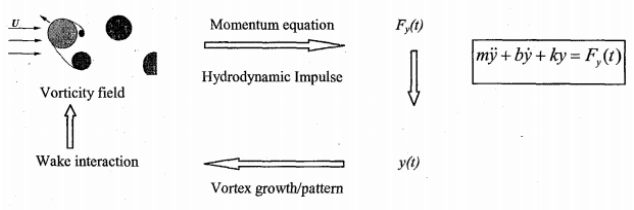


Figura 4.- Ciclo de generación de vibraciones inducidas por flujo (VIV) tomada de (Gharib, 1999).

Hay cinco fuentes de energía oceánica: olas, corrientes, mareas, gradiente térmico y gradiente de salinidad. A continuación, se presentan algunas limitaciones de estos dispositivos; a) los convertidores basados en la oscilación de la superficie, como la columna de agua, la boya, el flap o el péndulo, tienen una alta producción de energía sólo en una banda muy estrecha de frecuencias de onda cercanas a la resonancia. En cualquier ubicación particular, las ondas son aleatorias, lo que permite una pequeña ventana de rendimiento óptimo. Además, las olas ocasionalmente aplican cargas extremas a las estructuras, b) los convertidores de turbinas y molinos de agua de energía eólica o mareomotriz pueden extraer energía proporcionalmente a su superficie proyectada con una eficiencia del 15 al 30% y solo para corrientes superiores a 2 m/s (4 nudos), por debajo de las cuales no funcionan eficientemente, c) los convertidores de energía mareomotriz requieren una altura mínima de 5 m y son muy grandes y tan llamativos como las presas de agua. También requieren un período de construcción de 5 a 7 años y un costo de capital inicial significativo, d) la mayoría de los convertidores operan en la superficie, cerca de la costa y ocupan valiosos bienes inmuebles costeros, e) los convertidores como molinos de agua, turbinas o presas de marea perturban la vida marina (Bernitsas et al., 2008).

3.2 Modelo físico

El modelo físico de un hidro generador sin aspas se conforma de a) un cilindro rígido circular con diámetro D y longitud L, b) dos resortes lineales de soporte, cada uno de rigidez (k /2), c) sistema de amortiguamiento (C_{system}), compuesto por: amortiguamiento del generador (C_{gen}), amortiguamiento de la transmisión (C_{tram}) y amortiguamiento del generador de energía (C_{harn}). La configuración en su forma más sencilla consiste en, colocar un cilindro con su eje en la dirección z perpendicular a la velocidad del flujo U, la cual está en la dirección x, ocasionando la oscilación del mástil en la dirección y, que es perpendicular a su eje z y a la velocidad del flujo x (Bernitsas et al., 2008). En la Figura 5 se muestra el esquema y configuración del modelo.

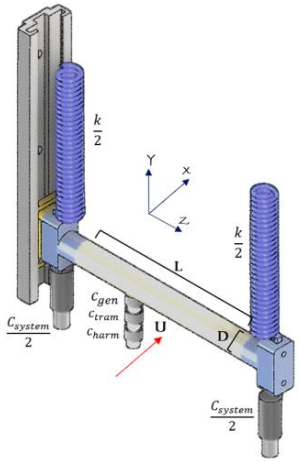


Figura 5.- Modelo hidro generador *VIV*, modificada de (Bernitsas et al., 2008).

ISSN: 2992-8338

3.3 Modelo matemático

El movimiento dinámico del cilindro en dirección (y) al flujo se puede demostrar mediante un modelo matemático lineal de segundo orden ($m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_{fluid}\hat{y}$ Ec. 4), en el cual se toman en consideración parámetros adimensionales, tales como: a) m_{osc}= masa del oscilador, b) c_{total}= amortiguamiento total del sistema, contemplando amortiguamientos de todos los componentes que lo integran, c) k= rigidez del sistema y d) F_{fluid}=fuerza de excitación.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_{fluid}\hat{y} \quad \text{Ec. 4}$$

En la Ec. 5, se separa la fuerza F (fuerza excitante) en componentes viscosos y no viscosos:

$$m_{osc}\ddot{y} + C_{total}\dot{y} + ky = F_{viscous}\hat{y} + F_{inviscous}\hat{y} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

$$F_{inviscous}\hat{y} = -m_a\ddot{y} \quad \text{Ec. 6}$$

$$F_{viscous}\hat{y} = \frac{1}{2}C_y(t)\rho U^2 DL \quad \text{Ec. 7}$$

Sustituyendo Ec.6 y Ec.7 en Ec.5

$$(m_{osc} + m_a)\ddot{y} + C_{total}\dot{y} + ky = \frac{2}{\pi D}C_y(t)m_d U^2 \quad \text{Ec. 8}$$

La Ec.9 presenta de forma adimensional la ec. de movimiento:

$$(m^* + C_a) * \left(\frac{\ddot{y}^*}{f^2_{n,water}} + \frac{4\pi\zeta_{total}\dot{y}^*}{f_{n,water}} + 4\pi^2 y^*\right) = \frac{2}{\pi}c_y(t)y^* \quad \text{Ec. 9}$$

Al considerar un movimiento sinusoidal, las soluciones propuestas en la literatura sobre la respuesta de la estructura son:

$$y^* = y^*_{max}\, sen(2\pi f_{fluid}t) \quad \text{Ec. 10}$$

$$C_y(t) = C_y\, sen(2\pi f_{fluid}t + \varphi) \quad \text{Ec. 11}$$

4. ESTUDIOS DEL DESEMPEÑO DE HIDRO GENERADORES SIN ASPAS

A partir del surgimiento de nuevas fuentes de energía, como la acuática o marina, junto con el aprovechamiento del fenómeno *VIV*, se han hecho avances en la recolección y generación de energía, la cual resulta ser renovable y amigable con el medio ambiente y su entorno que lo rodea.

4.1 Pruebas numéricas y experimentales con flujo controlado

El canal de aguas de superficie de baja turbulencia de la Universidad de Michigan ha sido sede de numerosos experimentos relacionados con el dispositivo *VIVACE*. Bernitsas *et al.* (Bernitsas et al., 2009), realizaron pruebas con el fin de demostrar la generación de energía que el dispositivo *VIVACE* puede generar. Las pruebas se realizaron a manera de que el dispositivo funcione con *VIV* y a un rango de número de *Reynolds* lo más alto posible. Es aquí donde por primera vez se menciona que se requiere un rango de sincronización para que funcione en un entorno realista. Ma *et al*. (Ma et al., 2016), estudiaron los efectos de la rigidez elástica, a través de amortiguamiento viscoso lineal en cada pieza que conforma el convertidor *VIVACE* de un solo cilindro. Modir and Goudarzi (Modir & Goudarzi, 2019), a partir de la variación en la rigidez de resortes (cinco variaciones), estudiaron de forma experimental el fenómeno *VIV* en un cilindro montado elásticamente en el canal de pruebas, con el fin de hacerlo vibrar a su frecuencia natural. Lefebure *et al.* (Lefebure et al., 2020), desarrollaron un experimento en el canal de agua de superficie libre de manera experimental un estudio a un cilindro rígido montado con resortes en los extremos sometido a movimiento inducido por flujo de fluido entre 0.5m/s a 1.0 m/s. Sin embargo, durante el proceso se percataron de que el gran número de parámetros involucrados en el convertidor, requieren ser optimizados ya que no están sincronizados.

Xu *et al.* (Xu et al., 2020), a través de pruebas experimentales a un cilindro rígido incorporando con número de Re (Reynolds) variado, el experimento se realizó con el dispositivo colocado a una distancia cerca de la superficie libre a una distancia relacionada con el diámetro del cilindro. Concluyeron que el dispositivo *VIVACE* al estar más cerca de la superficie libre, el fenómeno *VIV* se induce a unas velocidades más bajas. Gu *et al.* (Gu et al., 2020), investigaron de manera numérica tres diferentes ramas del *VIV* (rama inicial, rama superior y rama inferior), las cuales se manifiestan en un cilindro montado sobre un resorte, sometido a profundidades variables. Zhang *et al*. (Zhang et al., 2021) través de las ecuaciones bidimensionales inestables de *Reynolds-Avernage* de *Navier-Stokes* con el modelo de turbulencia de *Spalart-Allmaras*, realizaron un estudio con el fin de comprender la estimulación de turbulencias simétricas y asimétricas (laminar y turbulenta) de cilindros que oscilan en un grado de libertad. A través de la variación en valores de turbulencia de corriente: 0.2%, 1% y 5%, fue estudiada la influencia de la turbulencia en el patrón de vórtices. En base al estudio concluyeron que: a) el patrón o patrones de vórtices depende de la intensidad de la turbulencia que se aplique o que se encuentre en corriente libre. b) se pueden generar patrones múltiples de vórtices con un alto número de *Reynolds* y baja intensidad de turbulencia. c) la alta intensidad de turbulencia resulta en una separación menor en la generación de vórtices y ocasiona vórtices más alargados.

Johnson *et al.* (Theophilus et al., 2023), a través de un estudio numérico con análisis de Dinámica de Fluido Computacional (*CFD* por sus siglas en inglés) a través del software *ANSYS* aplicado a tres cilindros de diámetro distinto y sometidos a diferentes velocidades de flujo, dedujeron que a medida que aumenta el diámetro del cilindro, aumenta el nivel de energía producido por el cilindro.

Por otro lado, Ran *et al.* (Ran et al., 2023), realizaron un experimento en el laboratorio estatal de la sala de pruebas de simulación y seguridad de ingeniería hidráulica de la universidad de Tianjin en China (Figura 6) con un cilindro en configuración T llamado por ellos como *Cir-T-Att*. El experimento consiste en un canal el cual cuenta con una

ISSN: 2992-8338

reducción justo antes de llegar al dispositivo convertidor de energía y con ayuda de una bomba se hace recircular agua a velocidades constantes de flujo. Y se realiza con el fin de influenciar en el aprovechamiento inducido por el flujo con el oscilador *Cir-T-Att*.

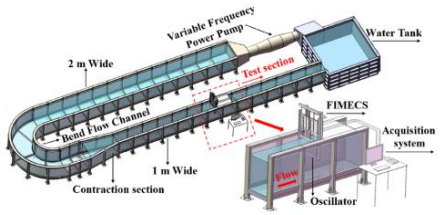


Figura 6.- Layout del canal experimental, utilizado por Ran *et al.* (Ran et al., 2023).

Irawan *et al.* (Irawan & Raza, 2023), a través de una configuración de cilindros *SBS* (*Side-By-Side*), estudiaron de manera experimental utilizando una combinación de técnicas de simulación de limites sumergidos de forzamiento directo, la respuesta de amplitud y eficiencia del *VIV* al exponerlos a dicho fenómeno en rangos de velocidades reducidas y cómo influye la relación de la masa, la amortiguación y el número de *Re* (*Reynolds*) en ello. Por otro lado, Park (Park, 2023), probó experimentalmente las vibraciones inducidas por vórtices, además de medir su amplitud y respuesta de frecuencia. Los resultados de amplitud mostraron cuatro ramas diferentes: rama inicial, rama superior, rama inferior y rango de desincronización. A través del coeficiente de fuerza del fluido los resultados arrojaron que el coeficiente de sustentación máximo se produce en la rama superior, es decir una vez iniciado el movimiento, y junto con ello, se propone un modelo matemático para estimar las fuerzas de los fluidos debidas a *VIV* sin la necesidad de utilizar dispositivos de medición. Con este modelo es posible estimar los coeficientes de fuerza del fluido y el desfase utilizando la respuesta de amplitud y frecuencia de las *VIV*

4.2 Control pasivo de turbulencia (PTC)

Para que los hidro generadores sin aspas, puedan funcionar correctamente con el aprovechamiento del *VIV* es muy importante conocer dos fenómenos que ocurren dentro del *MFI* (movimiento inducido por el flujo) las *VIV* y el galope, así como conocer bajo qué parámetros ocurre uno y otro. Se ha buscado, a través de estudios utilizando tiras rugosas adheridas llamadas dispositivos *PTC* (control pasivo de turbulencia) a las diferentes configuraciones de cilindros (Figura 7) se han realizado pruebas: experimentales (Chang et al., 2011), (Lee & Bernitsas, 2011), usanso simulación simulaciones de dinámica de fluidos computacional (*CFD*) (Liu & Bernitsas, 2015), (Ding et al., 2016), (Ding et al., 2021) y de forma numérica a través de ecuaciones bidimensionales inestables de *Reynolds-Averanged Navier-Stokes* (Ding et al., 2019). Con el fin de modificar el ángulo de ataque del fluido y con ello modificar y/o aumentar el desprendimiento de vórtices y por ende una mayor oscilación del cilindro.

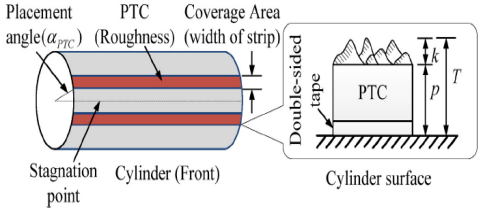


Figura 7.- a) Dispositivos Control Pasivo de Turbulencia (W. Ding et al., 2019)

Por otro lado, Zhao *et al.* (Zhao et al., 2020) realizaron pruebas numéricas con una propuesta similar a los dispositivos *PTC*, sin embargo, no utilizaron tiras rugosas. En su lugar se simularon ranuras directamente en la superficie del cilindro a una distancia angular con respecto a su eje horizontal. Concluyendo que comportamiento del cilindro con ranuras tiende a tener el mismo comportamiento que un liso (sin ranuras), solo que al variar el ángulo de distancia de las ranuras puede aumentar el número de *VIV* (Figura 8).
En la *Tabla 1* se muestran un resumen sobre la literatura recolectada, así como su enfoque y la cantidad correspondiente a cada uno.

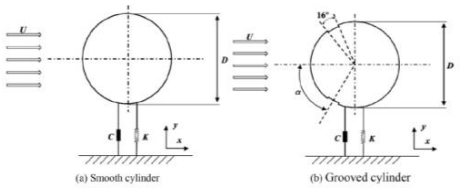


Figura 8.- Diagramas a) cilindro liso y b) cilindro con ranuras (Zhao et al., 2020).

Tabla 1.- Condensado de artículos.

ENFOQUE	TIPO DE INVESTIGACIÓN	CANTIDAD
FLUJO CONTROLADO	NUMÉRICO	5
	CFD	1
	EXPERIMENTAL	5
CONTROL DE TURBULENCIA	PTC	5
	RANURAS	1
OTRO	ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE FLUIDO-ESTRUCTURA	13

6. CONCLUSIONES

Este trabajo se reporta una recopilación de información reportada en la literatura, desde 2008 hasta 2023, sobre un nuevo concepto de generación de energía limpia y renovable de las corrientes oceánicas y pluviales. Se han realizado investigaciones sobre hidrogeneradores sin aspas los cuales aprovechan el desprendimiento de vórtices.
Con la información recopilada fue posible deducir lo siguiente:

- Los hidro generadores sin aspas representan una innovación fascinante en el campo de la energía hidroeléctrica. A diferencia de los generadores

ISSN: 2992-8338

hidráulicos convencionales, que utilizan turbinas con palas para convertir la energía cinética del agua en electricidad, así como ventajas económicas, ambientales y energéticas.

- A pesar de ser una tecnología que lleva más de una década en investigación, aún se encuentra en fase de desarrollo por todos los parámetros y variables que se involucran en su funcionamiento.
- La mayoría de las investigaciones relacionadas al estudio de estos hidro generadores se han desarrollado bajo condiciones controladas, es decir que aún siguen en la realización de pruebas bajo condiciones realistas.
- Se han desarrollado componentes los cuales ayuden al control de turbulencia y así modifiquen el desprendimiento de vórtices y con ello el comportamiento de la oscilación.
- Esta tecnología presenta un gran reto debido a que aún no se ha sintonizado el hidro generador con la fuerza de excitación, para un correcto funcionamiento en cualquier flujo de corrientes acuáticas.
- Las tiras rugosas o *PTC*, presentan una alternativa para la modificación del ángulo de ataque del fluido al aportar al cilindro del hidro generador rugosidad y al poder modificar el ángulo de colocación de estos es posible lograr modificar el desprendimiento de vórtices.

7. TENDENCIAS A FUTURO

El estudio de los hidro generadores *VIV* al ser una tecnología aun en desarrollo ha despertado un gran interés por la comunidad, es por eso que, en base a los datos obtenidos en la literatura, es posible deducir que existen muchas áreas de mejora en estos, a continuación, se mencionan algunos:

- Sintonizar la frecuencia del hidrogenerador con la del desprendimiento de vórtices
- optimización de la hidrodinámica del *VIV* y el desprendimiento de vórtices bajo a alta amortiguación
- optimización del rango de sincronización y la amplitud de *VIV* bajo alta amortiguación.
- optimización de la toma de energía.
- Se requieren más estudios para comprender los mecanismos físicos subyacentes y diseñar el *PTC* óptimo.
- Se requiere emplear un sistema de frecuencia natural ajustable para tener una cosecha de energía óptima en los convertidores de energía oceánica basados en *VIV* en un rango ampliado de operación.

AGRADECIMIENTOS

Hugo Andres Mauricio agradecer el apoyo al CONACYT a través de la beca para estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica.

REFERENCIAS

Bernitsas, M. M., Ben-Simon, Y., Raghavan, K., & Garcia, E. M. H. (2009). The VIVACE Converter: Model Tests at High Damping and Reynolds Number Around 105. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, *131*(1). https://doi.org/10.1115/1.2979796

Bernitsas, M. M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., & Garcia, E. M. H. (2008). VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, *130*(4). https://doi.org/10.1115/1.2957913

Blevins, R. D. (2001). *Flow-induced vibration*. Krieger publ.

Cabello, V. (2022). *Plantas de energías renovables marinas: Efectos potenciales en mamíferos marinos y medidas de mitigación*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE)).

Cajas, J. C., & Ancona, X. (2023). *UN GIRO A LA ENERGÍA: LAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR VÓRTICES, PINGÜICA-AGLUTINANDO CONOCIMIENTO Numero 6 (2023)*. https://www.pinguica.org

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos*.

Chang, C.-C., & Bernitsas, M. M. (2011). Hydrokinetic Energy Harnessing Using the VIVACE Converter With Passive Turbulence Control. *Volume 5: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy*, 899–908. https://doi.org/10.1115/OMAE2011-50290

Chang, C., Ajith Kumar, R., & Bernitsas, M. M. (2011). VIV and galloping of single circular cylinder with surface roughness at 3.0×104≤Re≤1.2×105. *Ocean Engineering*, *38*(16), 1713–1732. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.013

Ding, L., Zhang, L., Bernitsas, M. M., & Chang, C.-C. (2016). Numerical simulation and experimental validation for energy harvesting of single-cylinder VIVACE converter with passive turbulence control. *Renewable Energy*, *85*, 1246–1259. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.088

Ding, W., Sun, H., Xu, W., & Bernitsas, M. M. (2019). Numerical investigation on interactive FIO of two-tandem cylinders for hydrokinetic energy harnessing. *Ocean Engineering*, *187*, 106215. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106215

Ding, W., Sun, H., Xu, W., & Bernitsas, M. M. (2021). Experimental and computational investigation of interactive flow induced oscillations of two tandem rough cylinders at 3×104≤Re≤1.2×105. *Ocean Engineering*, *223*, 108641. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108641

Facchinetti, M. L., de Langre, E., & Biolley, F. (2004). Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, *19*(2), 123–140. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2003.12.004

Gharib, M. R. (1999). *Vortex-Induced Vibration,-Absence of Lock-in and Fluid Force Deduction Thesis by*.

Gu, M., Song, B., Zhang, B., Mao, Z., & Tian, W. (2020). The effects of submergence depth on Vortex-Induced Vibration (VIV) and energy harvesting of a circular cylinder. *Renewable Energy*, *151*, 931–945. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.086

Irawan, Y. H., & Raza, S. A. (2023). Vortex-induced vibration of two circular cylinders in a side-by-side arrangement at moderate Reynolds number: A numerical study. *Physics of Fluids*, *35*(5). https://doi.org/10.1063/5.0139301

Kim, E. S., Sun, H., Park, H., Shin, S., Chae, E. J., Ouderkirk, R., & Bernitsas, M. M. (2021). Development of an alternating lift converter utilizing flow-induced oscillations to harness horizontal hydrokinetic energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *145*, 111094. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111094

Lee, J. H., & Bernitsas, M. M. (2011). High-damping, high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter. *Ocean Engineering*, *38*(16), 1697–1712. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.06.007

Lee, Y. J., Qi, Y., Zhou, G., & Lua, K. B. (2019). Vortex-induced vibration wind energy harvesting by piezoelectric MEMS device in formation. *Scientific Reports*, *9*(1), 20404. https://doi.org/10.1038/s41598-019-56786-0

Lefebure, D., Dellinger, N., François, P., & Mosé, R. (2020). Analytical and CFD study of the influence of control parameters on the maximum efficiency of a hydro-power conversion system based on vortex-induced vibrations. *Renewable Energy*, *155*, 369–377. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.068

ISSN: 2992-8338

Liu, J., & Bernitsas, M. M. (2015, May 31). Envelope of Power Harvested by a Single-Cylinder VIVACE Converter. *Volume 9: Ocean Renewable Energy*. https://doi.org/10.1115/OMAE2015-42333

Ma, C., Sun, H., Nowakowski, G., Mauer, E., & Bernitsas, M. M. (2016). Nonlinear piecewise restoring force in hydrokinetic power conversion using flow induced motions of single cylinder. *Ocean Engineering*, *128*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.10.020

Modir, A., & Goudarzi, N. (2019). Experimental investigation of Reynolds number and spring stiffness effects on vortex induced vibrations of a rigid circular cylinder. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, *74*, 34–40. https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.10.016

Park, H. (2023). Estimation of Fluid Force for Renewable Energy Generation Using Vortex-induced Vibrations. *New & Renewable Energy*, *19*(2), 23–30. https://doi.org/10.7849/ksnre.2023.0006

Ran, D., Lian, J., Yan, X., Liu, F., Shao, N., Yang, X., & Li, L. (2023). Flow-Induced Motion and Energy Conversion of the Cir-T-Att Oscillator in a Flow Field with a High Reynolds Number. *Journal of Marine Science and Engineering*, *11*(4), 795. https://doi.org/10.3390/jmse11040795

S. Rao, S. (2011). *VIBRACIONES MECÁNICAS*.

Sarpkaya, T. (2004). A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, *19*(4), 389–447. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2004.02.005

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Beneficios de usar energías renovables*. Septiembre 25. https://www.gob.mx/semarnat/articulos/beneficios-de-usar-energias-renovables-172766

Theophilus, K., Enibe, S. O., & Mgbemene, C. A. (2023). Size Dependence of Vortex-Induced Vibrations Based Energy Converter Bluff Body cylinder. In *Scope* (Vol. 13). www.scope-journal.com

Wang, J., Geng, L., Ding, L., Zhu, H., & Yurchenko, D. (2020). The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations. *Applied Energy*, *267*, 114902. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114902

Williamson, C. H. K., & Govardhan, R. (2004a). Vortex-induced vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*, *36*, 413–455. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128

Xu, W., Yang, M., Wang, E., & Sun, H. (2020). Performance of single-cylinder VIVACE converter for hydrokinetic energy harvesting from flow-induced vibration near a free surface. *Ocean Engineering*, *218*, 108168. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108168

Zhang, D., Wang, W., Sun, H., & Bernitsas, M. M. (2021). Influence of turbulence intensity on vortex pattern for a rigid cylinder with turbulence stimulation in flow induced oscillations. *Ocean Engineering*, *237*, 109349. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109349

Zhao, G., Xu, J., Duan, K., Zhang, M., Zhu, H., & Wang, J. (2020). Numerical analysis of hydroenergy harvesting from vortex-induced vibrations of a cylinder with groove structures. *Ocean Engineering*, *218*, 108219. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108219

ISSN: 2992-8338

A Contemporary Brief Review of Low Power Turbines in Pipe.

David Paez*, M.A. Chagolla-Aranda*, E. Rosado-Tamariz*, M.A. Chagolla-Gaona, Arturo Abúndez-Pliego*.**

**Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Mor., México C.P. 62490*

***Tecnológico Nacional de México/Zacatepec, Mor., México C.P. 62780*

(Tel: 777 362 7770; email: m23ce148@cenidet.tecnm.mx, miguel.ca@cenidet.tecnm.mx, erik.rt@cenidet.tecnm.mx, miguel.cg@zacatepec.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx)

Abstract:

The use of electric power is indispensable nowadays. However, using fossil fuels for its generation results in high environmental pollution. Despite large-scale hydropower is one of the most widely applied renewable energies today, small-scale hydropower is becoming more popular worldwide as a sustainable source of green energy. It is considered safe, renewable, and clean, as it does not deplete the water used nor produce toxic or polluting substances. The kinetic energy available in the pipeline can be extracted by turbines capable of converting that water energy into mechanical energy. The flow in the pipeline has pressure and velocity, and the turbine uses the water velocity to generate electricity. Vertical axis turbines are preferred for pipelines because the generator is perpendicular to the direction of the pipeline. This allows for moderate modifications to the pipeline without drastic changes for implementation. Several types of turbines are discussed in the literature, focusing on the efficiency and generated power of each. Furthermore, some important parameters to produce more hydropower are mentioned, which affect the turbine efficiency like the number of blades, fluid velocity, blade twist angle, rotor diameter, and airfoil.

Keywords: Distributed energy, green energy, hydroelectric turbines in pipelines, water distribution networks, numerical simulation.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía mundial ha aumentado hasta un 600% en el último siglo derivado de la revolución industrial (Pasten y Santamarina, 2012). Durante ese periodo, la energía ha sido obtenida principalmente por medio de combustibles fósiles. Sin embargo, hoy en día y en un futuro próximo, se espera que las energías renovables se establezcan para ayudar a mantener el crecimiento sustentable, así como la calidad de vida. De esta manera, para el año 2040, se espera reducir el consumo energético empleando combustibles fósiles a los niveles de 2010 (Pérez-Sánchez et al., 2017). Las fuentes de energía renovable han tenido una significativa atención como consecuencia del incremento en los niveles de contaminación y emisiones de gases de efecto invernadero, por lo cual, muchos países están tomando iniciativas apropiadas para su implementación a gran escala. La alternativa de generación de energía limpia ha sido estudiada en sus distintos tipos, como la energía solar, eólica, mareomotriz, hidráulica, calorífica y biomasa (Aziz et al., 2021).

La energía hidroeléctrica en pequeña escala se está volviendo más popular alrededor del mundo como fuente sustentable de energía verde debido a que se considera segura, renovable y limpia, dado que no agota el agua utilizada, ni produce sustancias tóxicas o contaminantes (Patel et al., 2022). Recientemente ha comenzado a desarrollarse tecnología basada en la energía hidráulica de pequeña escala, empleada para producir electricidad, denominada turbina hidroeléctrica en tuberías de redes de distribución de agua. La energía disponible en la tubería puede extraerse mediante turbinas capaces de convertir energía cinética del agua en energía mecánica (Vidya y Surendar, 2016). Cuando el área de la tubería se reduce, convierte la energía de presión en energía cinética, lo que resulta en un incremento de la velocidad. Esta velocidad del agua es aprovechada por la turbina y permite generar electricidad mediante un generador eléctrico, (Dixit et al., 2017).

La energía eléctrica obtenida mediante las turbinas hidroeléctricas en tuberías puede ser destinada para el monitoreo de redes de distribución de agua industriales y suministro para la población. Debido a que se presentan diversos problemas como las restricciones de espacio y los limitados recursos energéticos con los que generalmente se cuenta para alimentar extensas redes de sensores que monitoreen de forma continua y confiable el suministro. En este contexto, las turbinas de baja potencia pueden ser utilizadas como una alternativa confiable para generar la energía que se requiere para que los sensores utilizados en redes de distribución operen adecuadamente (Chen et al., 2013). Actualmente, los dispositivos utilizados para el monitoreo de redes de distribución de agua funcionan generalmente con baterías químicas desechables, (Samora et al., 2016). Por esta razón, encontrar una fuente de energía verde asequible que alimente los dispositivos y utilice el

ISSN: 2992-8338

exceso de presión disponible en las tuberías, sería benéfico para el medio ambiente, evitando la generación de deshechos y reduciendo costos al dejar de utilizar dispositivos consumibles como las baterías. Este *review* destaca una recaudación de investigaciones en general tanto numéricas como experimentales de turbinas de eje vertical en tuberías de redes de distribución de agua (domésticas), a diferencia de otros reviews que solo se centran en un solo tipo de turbina como Al-Gburi et al., (2022) o en otra aplicación fuera de las redes de distribución (Vermaak et al., 2014).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Turbinas hidráulicas de baja potencia

Tradicionalmente, las turbinas hidráulicas se han clasificado en turbinas de acción y reacción, más comúnmente denominadas turbinas Kaplan, turbinas Pelton, turbinas Francis, turbinas Ossberger, etc. Estas turbinas fueron concebidas para la generación a gran escala, es decir, para producir cientos o miles de kW de energía. A medida que pasaron los años, los sistemas hidroeléctricos de pequeña escala se consideraron cada vez más como una fuente importante de energía renovable en algunas partes del mundo. Las dos principales ventajas de usar turbinas de baja potencia son una mayor eficiencia en comparación a la energía solar y eólica y una menor variación de la energía producida (Uhunmwangho y Okedu, 2009). Actualmente, existen diversas tecnologías que permiten aprovechar la energía de distintas fuentes, lo que da lugar a la aparición de las turbinas hidráulicas de pequeña escala para aplicaciones en tuberías a presión. En la actualidad, estas son turbomáquinas hidráulicas que aprovechan la presión de un fluido (generalmente agua) para provocar el movimiento de un pequeño generador eléctrico y producir electricidad. Las turbinas de eje vertical en tuberías son preferidas debido a que el generador es perpendicular a la dirección de la tubería, por lo que permite modificar la tubería moderadamente, en comparación las turbinas de eje horizontal que su eje es paralelo, por lo que tendría que haber grandes modificaciones en las tuberías para su funcionamiento.

Un sistema de generación en una tubería consta de un generador eléctrico, sellos mecánicos para no permitir el paso de agua hacia el generador, acoplado a la parte final de un eje se encuentra la turbina (impulsor o *impeller* en inglés) dentro de la tubería. Algunas turbinas utilizan guías o bloqueos, que son elementos utilizados para modificar la velocidad del fluido a la entrada de la turbina, como se muestra en la Figura 1.

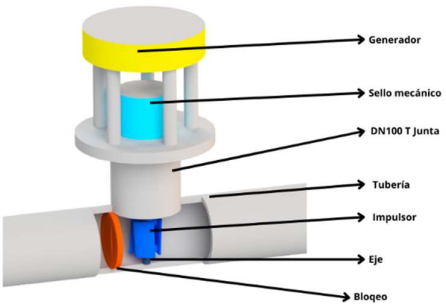


Figura 1. Esquema de una turbina de eje vertical.

2.2 Turbinas de eje vertical en tuberías

Las turbinas para sistemas hidroeléctricos en tuberías se clasifican de acuerdo con la dirección de su eje de rotación de forma análoga a los aerogeneradores. Por consiguiente, en una turbina de eje vertical, su eje de rotación es perpendicular a la dirección del flujo. Mientras que, en una turbina de eje horizontal la dirección del flujo de agua y el eje de rotación de la turbina son paralelos (Zanette et al., 2010). La turbina debe instalarse directamente en la tubería de suministro de agua. Para garantizar el suministro normal de agua posterior a la colocación de la turbina, se deben cumplir los siguientes requisitos:

1. No cambiar la dirección original del flujo de agua.
2. Estructura sencilla y de fácil instalación.
3. No afectar la calidad del agua.
4. Buena habilidad de arranque a bajo caudal y baja presión.

La turbina de eje vertical es la mejor opción para cubrir los requisitos anteriormente mencionados de acuerdo con Yang et al. (2019).

La estructura de una turbina hidráulica de eje vertical es derivada de la turbina de eje vertical eólica. Estas se pueden clasificar principalmente de dos tipos: a) Sustentación o tipo Darrieus; b) Aarrastre o tipo Savonius. En la literatura, se han reportdao otro par de tipos de turbinas verticales, conocidas como turbinas Gorlov y Lucid que son derivadas del principio de funcionamiento de la turbina Darrieus, (Yang et al., 2019). La fuerza de sustentación es la fuerza que permite que el álabe de la turbina genere energía a partir del flujo del agua, sucede cuando el agua toca la superficie curvada del álabe (perfil aerodinámico), haciendo que la presión en la parte superior disminuya y la presión en la parte inferior aumente, creando así una fuerza de empuje (sustentación) que impulsa al álabe y, por lo tanto, a la turbina. La fuerza de arrastre es la resistencia que tiene el álabe de la turbina al flujo del agua.

En la Figura 2 se muestra la estructura principal y componentes de una turbina de arrastre, destacando su tipo de álabe en forma de cuchara. Mientras que, en la Figura 3, se muestra la estructura principal y componentes de una turbina de sustentación, como se explicó anteriormente, la fuerza de sustentación es generada debido al perfil aerodinámico del álabe. En la Figura 4. Modelo de una turbina Gorlov (Bachant y Wosnik, 2015).Se presenta modelo de una turbina Gorlov, cuya principal característica son sus álabes helicoidales con un perfil aerodinámico torcido. La turbina tipo Lucid, se muestra en la Figura 5. Modelo de una turbina Lucid (Bachant y Wosnik, 2015).Figura 5, esta turbina también tiene un perfil aerodinámico en los álabes, pero con una forma helicoidal-esférica.

ISSN: 2992-8338

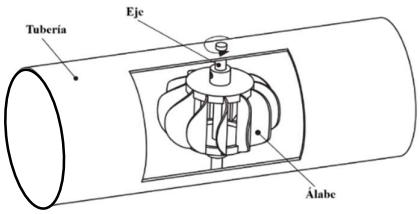


Figura 2. Estructura principal de una turbina de arrastre (Yang et al., 2019).

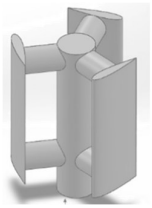


Figura 3. Modelo de una turbina de sustentación (Mutlu y Çakan, 2018).



Figura 4. Modelo de una turbina Gorlov (Bachant y Wosnik, 2015).



Figura 5. Modelo de una turbina Lucid (Bachant y Wosnik, 2015).

El propósito del diseño y aplicaciones de las turbinas de eje vertical es extraer la máxima energía disponible en las corrientes de flujo de agua en las tuberías, lo cual es diferente a las turbinas convencionales que consumen la presión extra proporcionada por el sistema de agua.

3. ESTADO DEL ARTE

La revisión del estado del arte presentada en este artículo está basada en lo reportado en 26 artículos técnicos, los cuales son una selección de las fuentes de información más relevantes relacionadas con turbinas de ejes vertical en tuberías.

La principal ventaja de realizar simulaciones numéricas en los procesos de análisis, diseño y optimización es la disminución de costos y tiempos en comparación con el desarrollo de prototipos experimentales que muy probablemente van a fallar en la primera iteración. Además de generar diseños más efectivos antes de manufacturarlos (Jiyun et al., 2019). Sin embargo, el tiempo y los recursos para realizar simulaciones también puede llegar a ser importante, por lo que es necesario, contar un equipo de cómputo adecuado y el conocimiento de la herramienta de simulación a utilizar. Por otro lado, en un banco de pruebas experimentales se producen resultados realistas, debido a que en el proceso de simulación se idealizan y suponen algunas condiciones, lo que conlleva algunas diferencias o inexactitudes. Por consiguiente, para investigar el rendimiento integral de una turbina y validar los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas, se deben diseñar y construir bancos experimentales de laboratorio (Payambarpour et al., 2019).

Amjadi et al. (2020) fabricaron una turbina de baja potencia esférica hueca de eje vertical con el objetivo de mostrar el desempeño para diferentes números álabes en el diseño de la turbina. Utilizaron el software SOLIDWORKS, para crear sus diseños que incluyen diversas configuraciones de turbinas con distintos números de álabes, huecas y sólidas. Estas turbinas fueron de tipo arrastre. Como resultado obtuvieron una potencia máxima de 95.4 W para una turbina hueca y 4.86 W de potencia mínima empleando la configuración de turbina sólida. En ambos casos, utilizando turbinas con 10 álabes. Por otra parte, Chen et al. (2013) realizaron un experimento en el que utilizaron una turbina de arrastre de eje vertical que generó energía a partir del flujo de agua de una tubería de suministro de agua de 100 mm y a una velocidad de 1.5 m/s. En sus experimentos, variaron el número de álabes, al igual que el tamaño del rotor, para llegar a un número final de 12 álabes con un diámetro del roto de 92 mm. Numéricamente, la potencia máxima determinada por los autores fue de 228 W, sin embargo, la caída de presión para las redes de distribución de agua tiene un límite de 5 m, por lo que se optó por la simulación de alrededor de 80 W, ya que dentro de ese valor era aceptable la caída de presión en la simulación. La turbina experimental alcanzó un valor máximo de 88.2 W y fue adoptada como la potencia final deseada.

Continuando con el análisis de diseños de turbinas en función del diámetro de la tubería, Yao et al. (2023) desarrollaron una turbina para una tubería de 200 mm. Este proceso lo realizaron mediante una adaptación tipo tubo Venturi a la tubería, la cual aceleraba el fluido a través de una reducción del diámetro de la tubería de 200 mm a 100 mm. Simularon numéricamente, para observar el comportamiento de la turbina, teniendo como resultando la potencia de salida de la turbina con variaciones de 0 a 97 W. En la parte experimental, sus resultados fueron de 5.5 a 88.2 W considerando la reducción de diámetro y el aumento en la velocidad del flujo, además de la variación del tubo Venturi a la entrada de la turbina.

Oladosu y Koya (2018) modelaron y simularon una turbina para una tubería de 250 mm empleando el software de simulación numérica Inventor, para una velocidad del flujo de agua de entre 0.4 a 1.8 m/s. Evaluaron el comportamiento de diferentes materiales para la manufactura de las microturbinas como el acero inoxidable y aluminio. De los resultados obtenidos, determinaron que la microturbina manufacturada

ISSN: 2992-8338

en aluminio sería capaz generar una potencia máxima de 1663 W, en comparación con una generación máxima de 1080 W para la microturbina de acero inoxidable.

El diámetro de tubería de 600 mm fue objeto de estudio en el trabajo de Ma et al. (2018), quienes utilizaron una turbina de sustentación. El pico de generación de energía reportado fue de alrededor de 100 W, el cual resultaba ser suficiente para alimentar un banco de baterías desarrollado en la investigación. Este diseño fue enfocado en el suministro de energía para un sistema de una medición continua del flujo y velocidad del agua.

Mutlu y Çakan, (2018), realizaron un estudio experimental evaluando el funcionamiento de turbinas tipo Darrieus, Gorlov y Lucid, para configuraciones de tres álabes. En el trabajo concluyen que la turbina reportada con mayor generación de energía fue el tipo Lucid con 6.9 W, pero con una disminución de presión de 16 KPa. En cambio, la turbina Gorlov presentó una potencia de 6.6 W. Finalmente establecen que debido a una menor disminución de presión de la turbina Gorlov, se eligió como la mejor entre las tres turbinas para la generación de energía en tuberías.

Yang et al., (2019), observaron el comportamiento de diferentes estudios tanto numéricos como experimentales. Teniendo como objetivo principal encontrar las diferencias entre las turbinas de sustentación y las de arrastre, evaluando su comportamiento con respecto a las turbinas eólicas tipo Darrieus (sustentación) y tipo Savonius (arrastre). Realizaron diferentes simulaciones a través de ANSYS CFX con variaciones de parámetros y se compararon con los resultados experimentales. Su conclusión fue que las turbinas de sustentación fueron las que presentaron mejores resultados para valores elevados de velocidad de agua y presión, ya que requieren mayor fuerza para empezar a impulsar los álabes en comparación a la turbina de arrastre que requiere menos velocidad y presión, pero generando menos energía. La potencia obtenida de manera numérica y experimentalmente fue de entre 29 W para las turbinas de arrastre y 100 W para las de sustentación, en una tubería de 200 mm de diámetro, con 6 álabes para la turbina de sustentación y 12 para la turbina de arrastre.

De igual manera, Zhang et al., (2021), diseñaron y experimentaron con el comportamiento de una turbina de arrastre, la cual posee dos álabes semi circulares y acoplados a un rotor hidrocinético. Adicionalmente, se centraron en la inclusión de platos deflectores en las caras de los álabes, para mejorar el desempeño y comportamiento del flujo de la turbina. El procedimiento se enfocó en diseñar una turbina con diferentes ángulos para el plato deflector de 30, 45 y 60°. Posteriormente, los autores procedieron a realizar experimentaciones variando la velocidad del fluido de 0.63, 0.68 y 0.73 m/s para obtener el coeficiente de potencia y algunos otros parámetros como el comportamiento del fluido con base en los grados de posición de la turbina. En último punto, compararon los resultados y llegaron a la conclusión de que la turbina con el ángulo de 60° y un flujo de 0.73 m/s a la entrada producía el mejor coeficiente de potencia de 0.463. Los autores recomiendan su uso, ya que previene el retorno de del fluido en los álabes, y, además, guía el fluido a la entrada de la turbina.

Por otra parte, se realizaron investigaciones en las que evalúan el posicionamiento en serie de turbinas, como lo reportan Zhang et al. (2019). Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento de dos rotores de arrastre hidrocinéticos uno tras otro, con diferentes diseños y posiciones relativas entre ellos. Para esto, se diseñó un rotor hidrocinético de tipo arrastre, el cual se evalúo numérica y experimentalmente para una configuración en fila de dos rotores. Después, desarrollaron simulaciones numéricas en ANSYS FLUENT para observar el comportamiento de la turbina. Posteriormente, realizaron la evaluación experimental empleando una cámara de alta resolución, con la finalidad de caracterizar el comportamiento del fluido que pasa a través de los rotores. Como conclusión reportan que, a mayor distancia entre las turbinas, los vórtices y turbulencias que dejan los rotores se disipan mejor, produciendo más torque el segundo rotor cuanto más alejado esté del primero. Cabe mencionar que el primer rotor logró el mayor coeficiente de potencia de 0.156.

Recientemente, estudios numéricos y experimentales se han realizado para optimizar parámetros geométricos y mejorar el coeficiente de potencia de distintos rotores de turbinas para sistemas presurizados. Un ejemplo de ello es el estudio realizado por Mosbahi et al., (2019), el cual se centró en el estudio una turbina tipo Lucid en una tubería con convergencia utilizando el software ANSYS FLUENT. El estudio fue realizado a partir de una investigación previa con un diseño de turbina ya establecido por el autor. Se concluyó que de los resultados numéricos obtuvieron un mayor coeficiente de potencia de 0.204. Además, mostraron que la convergencia a la entrada de la turbina Lucid es capaz de mejorar el rendimiento de la turbina al instalarse en un canal prismático.

La mayoría de las investigaciones numéricas utilizan ANSYS FLUENT o ANSYS CFX como herramienta de trabajo. Asimismo, hay trabajos reportados que empelan simuladores de flujo como flow simulation de SOLIDWORKS para sus evaluaciones, como el desarrollo presentado por Prasetyo et al., (2018). En esta investigación realizaron el diseño de una turbina de arrastre creada en SOLIDWORKS. Para el procedimiento de diseño de distintas configuraciones de turbinas emplearon diferentes ángulos entrada, bloqueos y número de álabes. Realizaron pruebas en los que concluyeron que, la turbina con seis álabes, 65° de curvaturas del álabe, 10° del ángulo de entrada y un bloqueo de 40°, presenta el mejor resultado para un torque máximo de 8.464 Nm.

En este contexto de utilizar diferentes softwares de simulación, Diab et al., (2022), reportaron el uso del software de código abierto OpenFOAM como un medio viable para realizar evaluaciones numéricas en este tipo de turbinas. Los autores realizaron pruebas para comparar sus resultados obtenidos con otras investigaciones logrando una buena convergencia. La metodología implementada fue enfocada en diseñar una turbina modificando características geométricas como el ángulo de entrada, ángulo de salida, número de álabes, espesor del álabe, entre otros. Posteriormente, evaluaron la influencia de distintos parámetros operativos como la presión, la velocidad de punta de aspa TSR (Tip Speed Ratio, por sus

ISSN: 2992-8338

siglas en inglés) y velocidad del flujo mediante simulaciones numéricas en OpenFOAM. La tubería del caso de estudio fue de 600 mm, evaluaron una turbina de sustentación con un diámetro de rotor de 590 mm, y obtuvo como resultado una potencia máxima de 1300 W con un rotor de 5 álabes. En conclusión, los autores, reportaron que se obtuvo resultados coherentes comparándolos con otras investigaciones previas y destaca la utilización del software de código abierto OpenFOAM como un método viable de simulación.

El software comercial ANSYS se destaca en este tipo de investigaciones debido a su popularidad y eficacia en procesos de simulación de un sinnúmero de aplicaciones. Por ejemplo, Tahadjodi Langroudi et al., (2020) modelaron una turbina de sustentación esférica considerando parámetros como el diámetro de la turbina, altura de la turbina, número de álabes, perfil aerodinámico inicial, ángulo de ataque, ángulo de inclinación de la turbina, el espesor y la longitudinal del perfil. Diseñaron algunas turbinas variando el número de álabes entre dos a siete. Posteriormente, realizaron las pruebas de simulación numérica en el software ANSYS FLUENT. Como conclusión, los autores determinaron que, si el número de álabes se incrementa, la potencia y el coeficiente de presión crecen. A su vez, las fluctuaciones de presión decrecen, pero la probabilidad de cavitación aumenta. Considerando el incremento del ángulo de ataque inicial en el perfil, el coeficiente de potencia disminuye a una cantidad mínima, después se incrementa gradualmente para finalmente llegar a la eficiencia mayor comparado con el valor inicial.

Otro ejemplo del uso de ANSYS, pero en turbinas de arrastre, es el trabajo presentado por Hasanzadeh et al., (2021), quienes desarrollaron una turbina con parámetros y variables no propuestas anteriormente en la literatura y su acoplamiento con una red neuronal artificial (ANN, por sus siglas en inglés) de desarrollo propio. El estudio consistió en proponer diferentes ángulos de entrada, ángulos de ataque, bloqueos, diámetros de rotor, diámetros de curvatura, entre otros. Después, utilizando el módulo CAD de SOLIDWORKS modelaron las diferentes turbinas y en ANSYS FLUENT simularon numéricamente el comportamiento de las turbinas. La herramienta ANN, fue empleada como un recopilador de datos que aplica una función lineal o no lineal para prever resultados con las simulaciones anteriores, ahorrando tiempo de simulación y obteniendo la mejor combinación de características posible. Finalmente, se tomaron valores de la ANN para optimizarlos y lograr los mejores resultados para la turbina. La turbina fue simulada en una tubería de 100 mm a una velocidad de fluido de 1.57 m/s, logrando una potencia máxima de 200 W, lo cual es destacable para el tamaño de tubería, demostrando la eficacia de la red neuronal artificial propuesta.

El último trabajo revisado por simulación fue de Bachant y Wosnik, (2015) en el cuál, realizaron un estudio con el objetivo de mostrar el desempeño del coeficiente de potencia de una turbina Lucid esférica en comparación de una turbina Gorlov de hélice. Para ello, diseñaron una turbina Lucid con cuatro álabes y una turbina Gorlov con tres hélices, ambas empleando un perfil aerodinámico NACA 0020. Como conclusión, obtuvieron numéricamente mediante simulaciones CFD que la turbina Gorlov presenta una eficiencia energética de 64% en comparación del valor máximo presentado por la turbina Lucid de 46%.

4. CONCLUSIONES

Se concluyen cinco puntos principales obtenidos de la literatura revisada:

i. Las turbinas de arrastre presentan mayor eficiencia en tuberías de menor diámetro (menor a 200 mm), mientras que las turbinas Darrieus para tuberías de mayor diámetro (200 mm en adelante). Las turbinas Gorlov y Lucid se pueden utilizar en ambos casos.

ii. La turbina Gorlov muestra un mejor desempeño en términos de eficiencia según lo reportado en la literatura, en comparación de las otras turbinas de sustentación y arrastre.

iii. Los principales parámetros que afectan la eficiencia de la turbina son: el número de álabes, al igual que la velocidad del fluido, el ángulo de torcimiento del álabe, el diámetro del rotor y el perfil aerodinámico.

iv. Los softwares de simulación comerciales tienen un buen desempeño reproduciendo los resultados obtenidos en los casos experimentales. Se destaca el uso del software OpenFOAM, que siendo de acceso libre, también ha sido validado con datos reportados en la literatura.

v. Las recomendaciones sugieren seguir experimentando con la forma del álabe, el perfil aerodinámico, el número de álabes, entre otros parámetros para mejorar la eficiencia y potencia generada por las turbinas de eje vertical.

5. REFERENCIAS

Al-Gburi, K. A. H., Alnaimi, F. B. I., Al-quraishi, B. A., Sann Tan, E., & Maseer, M. M. (2022). A comparative study review: The performance of Savonius-type rotors. *Materials Today: Proceedings*, *57*, 343–349. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.226

Amjadi, H., Khashehchi, M., & Soltani, J. (2020). Experimental investigation and numerical simulation of an inline low-head microhydroturbine for applications in water pipelines. *IET Renewable Power Generation*, *14*(16), 3209–3219. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1283

Aziz, M. S., Khan, M. A., Jamil, H., Jamil, F., Chursin, A., & Kim, D. H. (2021). Design and analysis of in-pipe hydro-turbine for an optimized nearly zero energy building. *Sensors*, *21*(23). https://doi.org/10.3390/s21238154

Bachant, P., & Wosnik, M. (2015). Performance measurements of cylindrical- and spherical-helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency. *Renewable Energy*, *74*, 318–325. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.049

Chen, J., Yang, H. X., Liu, C. P., Lau, C. H., & Lo, M. (2013). A novel vertical axis water turbine for power

ISSN: 2992-8338

generation from water pipelines. *Energy*, *54*, 184–193. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.064

Diab, G., Elhakeem, M., & Sattar, A. M. A. (2022). Performance assessment of lift-based turbine for small-scale power generation in water pipelines using OpenFOAM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, *16*(1), 536–550. https://doi.org/10.1080/19942060.2021.2019129

Dixit, V., Patel, N., & Jadhav, R. (2017). In-pipe Water Power Generation from Spherical Turbine. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, *8*(4). http://www.ijser.org

Hasanzadeh, N., Payambarpour, S. A., Najafi, A. F., & Magagnato, F. (2021). Investigation of in-pipe drag-based turbine for distributed hydropower harvesting: Modeling and optimization. *Journal of Cleaner Production*, *298*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126710

Jiyun, D., Zhicheng, S., & Hongxing, Y. (2019). Study on the effects of blades outer angle on the performance of inline cross-flow turbines. *Energy Procedia*, *158*, 1039–1045. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.252

Ma, T., Yang, H., Guo, X., Lou, C., Shen, Z., Chen, J., & Du, J. (2018). Development of inline hydroelectric generation system from municipal water pipelines. *Energy*, *144*, 535–548. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.113

Mosbahi, M., Ayadi, A., Mabrouki, I., Driss, Z., Tucciarelli, T., & Abid, M. S. (2019). Effect of the Converging Pipe on the Performance of a Lucid Spherical Rotor. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *44*(2), 1583–1600. https://doi.org/10.1007/s13369-018-3625-0

Mutlu, Y., & Çakan, M. (2018). Evaluation of in-pipe turbine performance for turbo solenoid valve system. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, *12*(1), 625–634. https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1506364

Oladosu, T. L., & Koya, O. A. (2018). Numerical analysis of lift-based in-pipe turbine for predicting hydropower harnessing potential in selected water distribution networks for waterlines optimization. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *21*(4), 672–678. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.05.016

Pasten, C., & Santamarina, J. C. (2012). Energy and quality of life. *Energy Policy*, *49*, 468–476. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.051

Patel, V., Rathod, V., & Patel, C. (2022). Experimental investigations on an inline low head axial flow turbine with hydrofoil shaped vanes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, *44*(4), 10214–10229. https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2143963

Payambarpour, S. A., Najafi, A. F., & Magagnato, F. (2019). Investigation of Blade Number Effect on Hydraulic Performance of In-Pipe Hydro Savonius Turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, *2019*. https://doi.org/10.1155/2019/8394191

Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F. J., Ramos, H. M., & López-Jiménez, P. A. (2017). Energy recovery in existing water networks: Towards greater sustainability. *Water (Switzerland)*, *9*(2). https://doi.org/10.3390/w9020097

Prasetyo, H., Budiana, E. P., Tjahjana, D., & Hadi, S. (2018). The Simulation Study of Horizontal Axis Water Turbine Using Flow Simulation Solidworks Application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *308*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/308/1/012022

Samora, I., Hasmatuchi, V., Münch-Alligné, C., Franca, M. J., Schleiss, A. J., & Ramos, H. M. (2016). Experimental characterization of a five blade tubular propeller turbine for pipe inline installation. *Renewable Energy*, *95*, 356–366. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.023

Tahadjodi Langroudi, A., Zare Afifi, F., Heyrani Nobari, A., & Najafi, A. F. (2020). Modeling and numerical investigation on multi-objective design improvement of a novel cross-flow lift-based turbine for in-pipe hydro energy harvesting applications. *Energy Conversion and Management*, *203*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112233

Uhunmwangho, R., & Okedu, E. K. (2009). *Small Hydropower for Sustainable Development*. http://www.akamaiuniversity.us/PJST.htm

Vermaak, H. J., Kusakana, K., & Koko, S. P. (2014). Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 29, pp. 625–633). https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.066

Vidya, M., & Surendar, E. (2016). Design and fabrication of spherical-s turbine. *International Journal of Latest Trends in Engineering & Technology*, *7*(3). https://doi.org/10.21172/1.73.011

Yang, W., Hou, Y., Jia, H., Liu, B., & Xiao, R. (2019). Lift-type and drag-type hydro turbine with vertical axis for power generation from water pipelines. *Energy*, *188*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116070

Yao, Y., Shen, Z., Wang, Q., Du, J., Lu, L., & Yang, H. (2023). Development of an inline bidirectional micro crossflow turbine for hydropower harvesting from water supply pipelines. *Applied Energy*, *329*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120263

Zanette, J., Imbault, D., & Tourabi, A. (2010). A design methodology for cross flow water turbines. *Renewable Energy*, *35*(5), 997–1009. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.014

Zhang, Y., Kang, C., Zhao, H., & Kim, H. B. (2021). Effects of the deflector plate on performance and flow characteristics of a drag-type hydrokinetic rotor. *Ocean Engineering*, *238*. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109760

Zhang, Y., Kang, C., Zhao, H., & Teng, S. (2019). Effects of in-line configuration of drag-type hydrokinetic rotors on inter-rotor flow pattern and rotor performance. *Energy Conversion and Management*, *196*, 44–55. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.003

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Estudio experimental de la recuperación del déficit de velocidad aguas abajo de un aerogenerador

*J. Hernandez-Cancino***. R. Campos-Amezcua***. R. Gómez-Martinez**. R. Sánchez-García*. L. Claudio- Pachecano***.*

J.J. Monjardín-Gámez.*

** Instituto de Energías Renovables - Universidad Nacional Autónoma de México. Privada Xochicalco S/N, Temixco, Mor. 62580 (Tel: 6871836283; e-mail: ijmoga@ier.unam.mx).*

***Instituto de Ingeniería - Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar S/N, Coyoacán, Ciudad de México, 04510 (e-mail: rgomezm@iingen.unam.mx , rsanchezg@iingen.unam.mx)*

**** Tecnológico Nacional de México - Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Mor. 62490. (e-mail: rafael.ca@cenidet.tecnm.mx)****Abstract***: *La generación de turbulencia atmosférica en túneles de viento es un tema importante en el estudio de la aerodinámica de las turbinas eólicas. Una entrada turbulenta generalmente se genera usando*

Para el estudio del déficit de velocidad es importante el estudio de las rejillas pasivas. Sin embargo, para obtener un campo de flujo similar al atmosférico se necesitan escalas de longitud relativamente grandes (L 30 cm) y altas intensidades de turbulencia (I 15%).
reproducido. En este trabajo, se ha utilizado la técnica de red pasiva en combinación con una sección de prueba de expansión aguas abajo para investigar la generación de
turbulencia tipo atmosférica, con la posibilidad de variar tanto la intensidad de la turbulencia como la escala de longitud integral del campo de flujo de forma independiente. cuatro pasivos
Se utilizaron rejillas con diferentes tamaños de malla y barras con cuatro velocidades del viento y cinco posiciones de medición aguas abajo. Se encontró que el campo de flujo es isotrópico.
y homogéneo para distancias menores a las recomendadas en la literatura (x=M 5). También se investiga en detalle por primera vez el efecto de la expansión sobre las características de turbulencia. El estudio confirma que añadiendo una sección de prueba de expansión es posible aumentar tanto la intensidad de la turbulencia como la longitud integral
escalar aguas abajo de la red con un impacto limitado en la calidad general del flujo en términos de anisotropía y espectros de energía.

Keywords: Estela; Generación de turbulencia; Aerogeneradores; Túnel de viento; Experimentación.

1. INTRODUCTION

En la actualidad, el modelo energético basado en el consumo de combustibles fósiles ha generado una alarmante crisis ambiental. Por ello, en los últimos años se ha impulsado el desarrollo y explotación de las fuentes renovables, especialmente en la energía eólica [1]. A pesar de que el aprovechamiento del recurso eólico suele realizarse a través de la instalación de grandes parques eólicos, existe un nicho de oportunidades para el desarrollo de aerogeneradores de baja potencia, gracias a su operación a bajas velocidades de viento, fácil instalación y bajos costos de mantenimiento, además de representar una opción viable para el suministro de energía a hogares interconectados o aislados a la red [2]. Las pequeñas turbinas eólicas se instalan regularmente en el campo o en entornos urbanos donde el rotor experimenta altos niveles de turbulencia ($Iu \geq 18\%$) con cambios bruscos de dirección del viento que modifican el rendimiento y comprometen la integridad estructural de los sistemas de conversión de energía eólica [3]. Numerosos estudios han utilizado enfoques experimentales y numéricos para investigar el impacto de la turbulencia en la producción de energía y la dinámica estructural. Por ejemplo, Lubitz [4] analizó un aerogenerador de eje horizontal Bergey XL de 1 kW en campo abierto e identificó que la intensidad de la turbulencia a bajas velocidades del viento produce un aumento en la producción de energía, mientras que a altas velocidades (velocidad de enrollado) el dispositivo mostró una disminución considerable. Evans et al. [5] analizaron una turbina eólica de eje horizontal Aerogénesis de 5 kW en un entorno semiurbano del campus de la Universidad de New Castle y mostraron que la producción de energía exhibía una disminución del 20% a intensidades de turbulencia altas, las mediciones experimentales se validaron utilizando un modelo numérico en el software FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence). Elizondo et al. [6] estudiaron experimentalmente el comportamiento de un aerogenerador de eje horizontal Aero-luz de 5 1.4 kW en campo abierto en condiciones de viento bajo y medio. Demostraron que a altas intensidades de turbulencia hay es una pérdida significativa de potencia,

ISSN: 2992-8338

también fue posible identificar aspectos aerodinámicos y electromecánicos para redefinir los parámetros de diseño de la turbina eólica, así como el desempeño aerodinámico se predijo mediante modelado numérico en los códigos XFoil y Blade Element Moment que mostraron buenos resultados de acuerdo con el enfoque experimental.

2. Metodología experimental

2.1 Materiales

La investigación se desarrolló en el túnel de viento de capa limite atmosférica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y Alianza FiiDEM. Las instalaciones son empleadas para el análisis de estructuras civiles y mecánicas, además son utilizadas para diversos tipos de estudios interés en ingeniería de viento. El túnel tiene dos secciones de pruebas, la sección 1 de 3 m x 2 m y la sección 2 de 3 x 3 m, Acceso al túnel de viento de lemat figura (1). Para la evaluación experimental se empleó un aerogenerador de eje horizontal de 600 W de 1.33 m de diámetro, fabricado con aspas de fibra de plástico reforzado con cuerda de 0.1 m, generador de imanes permanentes de 3 fases y voltaje de salida de 24 volts figura (2). Para la generación del viento turbulento se utilizo una reja pasiva de 3 por 2.2 metros, figura (3).

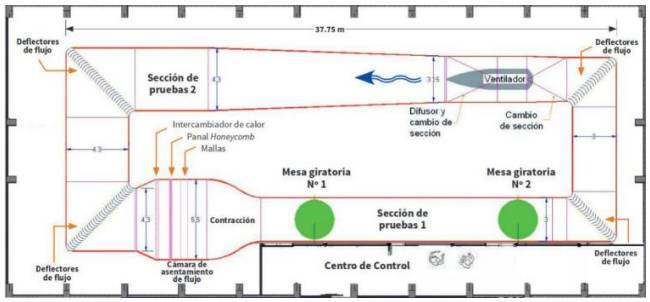


Figura 1. Túnel de viento de capa limite atmosférica del II-UNAM y alianza FiiDEM

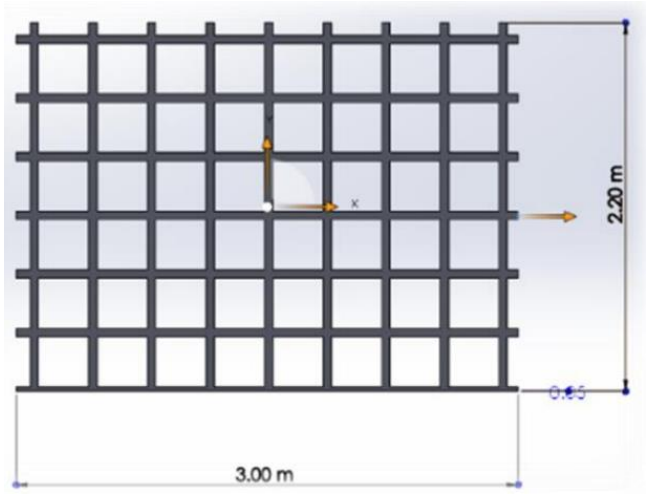


Figura 2. Características topológicas de la reja pasiva



Figura 3. Aerogenerador para el estudio experimental

2.2 Protocolo experimental

Las pruebas experimentales se dividieron en varias etapas las cuales fueron el de medir el flujo de viento dentro del túnel de viento para poder obtener un perfil de viento, la colocación de la reja pasiva para obtener de igual manera uin perfil de viento con la obstrucción de la reja pasiva, como tercera prueba se realizaron mediciones aguas debajo de un aerogenerador para estudiar el déficit de velocidad, y por último la combinación de la reja pasiva con el aerogenerador

2.3 Pruebas con flujo sin obstrucción

Para las primeras pruebas experimentales se realizaron mediciones sin ningún tipo de obstrucción esto para obtener un perfil de viento uniforme para posteriormente realizar las demás configuraciones, pero dicha primer medición es de gran utilidad para cuantificar intensidad de turbulencia, desviación estándar, densidad de potencia espectral, deficid de velocidad, etc. en la figura 4 observamos los puntos de medición, dichos puntos de medición se realizaron en la mesa giratoria 2 la podemos observar en la figura 1 .

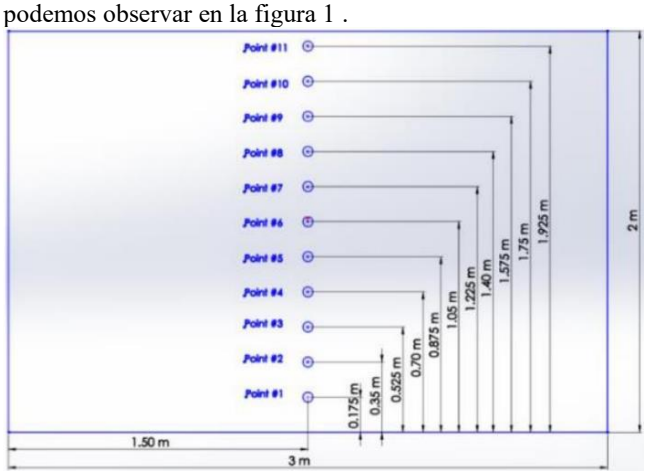


Figura 4. Puntos de medición

Debido a que esto es un primer acercamiento se obtuvo el siguiente perfil que Podemos observar en la figura 5 de velocidad buscado ya que es el que no tiene ningún obstáculo.

ISSN: 2992-8338

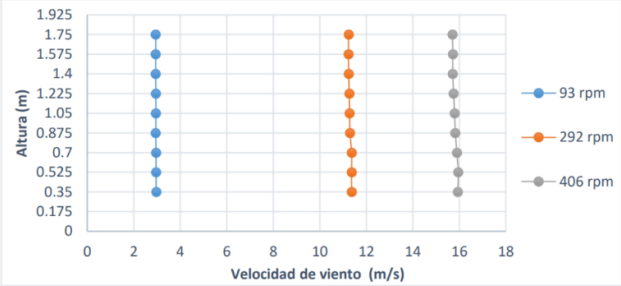
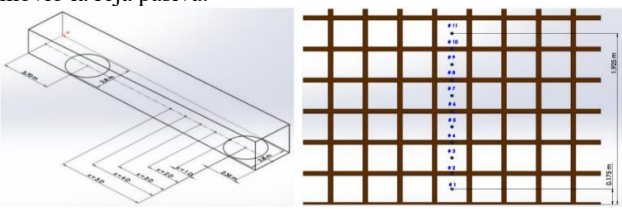


Figura 5. perfil de velocidad del viento

2.4 pruebas experimentales con reja pasiva

Para las pruebas experimentales la sonda de medición se mantuvo en la mesa 2 pero la reja pasiva se fue moviendo a lo largo de la sección de pruebas para poder adquirir diferentes perfiles de velocidad del flujo de viento y tener datos de los cuales se pueden estudiar diferentes fenómenos como intensidades de turbulencia, dispersión de datos, impacto de un obstáculo etc. en la figura 6 podemos ver los diferentes puntos de medición como también las diferentes distancias que se movió la reja pasiva.


Figura 6. zonas de medición y en el eje vertical y horizontal

al realizar las mediciones obtuvimos el siguiente perfil que podemos observar en la figura 7, donde observamos el impacto que tiene una interferencia en el flujo de viento y como este es afectado por la intensidad de turbulencia.

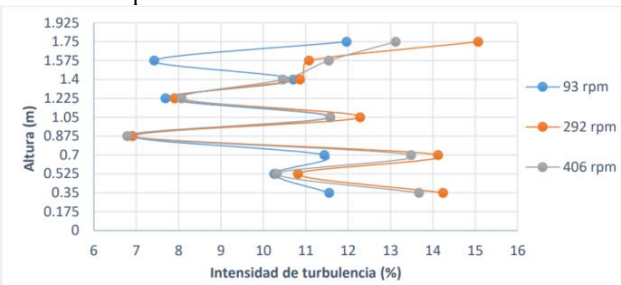
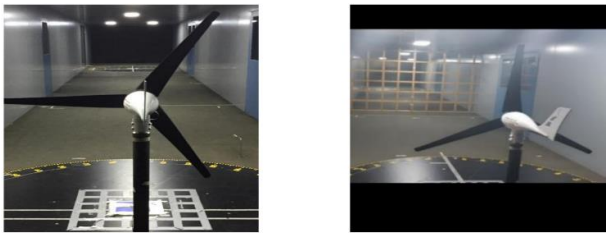


Figura 7. Perfil de turbulencia a 1D

2.5 pruebas experimentales con reja pasiva y aerogenerador

se realizaron mediciones de flujo de viento aguas abajo del aerogenerador con y sin reja pasiva (figura 8), el objetivo era observa como un obstáculo modificaba la generación eléctrica producida por el aerogenerador y observamos que con flujo uniforme la producción eléctrica es mayor ya que cuando el flujo atraviesa un obstáculo hay un déficit de velocidad que en nuestro caso impacta en la producción energética (figura 9)


Figura 8. Aerogenerador con y sin reja pasiva

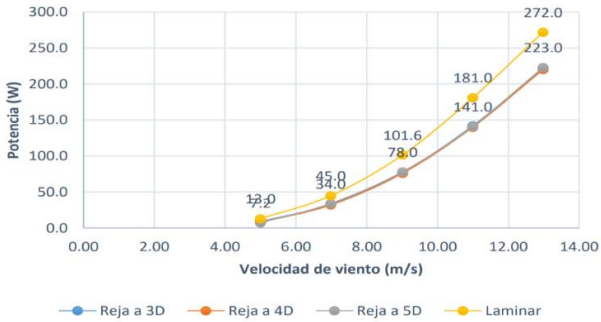
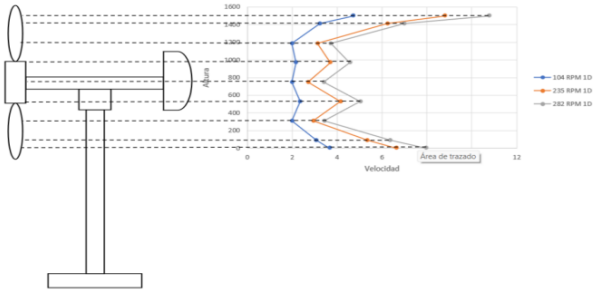


Figura 9. Decaimiento de potencia eléctrica

4. Estudio del déficit de velocidad

El aerogenerador se colocó a 1 diámetro de la sonda de medición aguas abajo (figura 10) y a 5 diámetros de distancia (figura 11), en base a los resultados obtenidos se pudo observar el comportamiento del decaimiento de la energía cinética, al atravesar el rotor del aerogenerador.


Figura 10. medición del déficit de velocidad a 1 diámetro del rotor

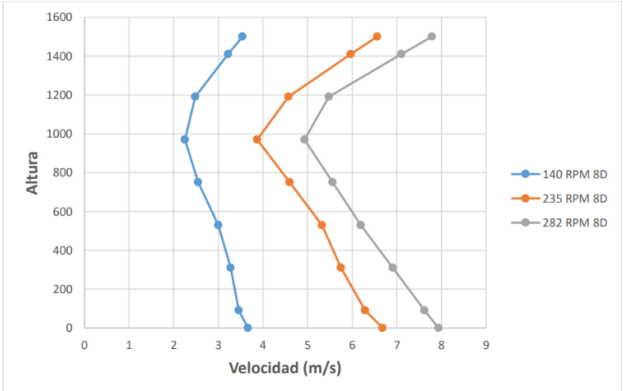


Figura 11. Grafica del déficit de velocidad a 5 diámetros

ISSN: 2992-8338

4. Conclusiones

El impacto del déficit de velocidad influye mucho en la producción de energía eléctrica en un aerogenerador provocando que su eficiencia sea menor a la esperada; debido a esto es importante tomar en cuenta la zona donde se colocara un aerogenerador para la producción de energía eléctrica, ya que si incluso en una granja no se distribuyen bien los aerogeneradores la zona podrá tener un alto recurso eólico pero la afectación del déficit de la velocidad del viento aguas abajo entre uno y otro aerogenerador podría traer grandes repercusiones.

REFERENCES

[1] Rezaeiha, A. Montazery, H. Blocken, B.” A framework preliminary large-scale urban wind energy potential assessment: roof-mounted wind turbines” Energy, vol 214,2020.

[2] Jiménez, A. (2017). Caracterización numérica de la turbulencia en la estela de una Aero turbina mediante un modelo de simulación de grandes escalas. Tesis inédita de doctorado. Universidad politécnica de Madrid. Madrid.

[3] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial W., Scott, G., Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060 February 2009.

[4] Ismail, A. Johanis, J. Erlanda, A. Suyitmo, B. Rahayu, G. Rhakasywi, D. (2020). Computational fluid dynamics simulation of the turbulence models inthe tested section on wind tunnel. Ain Shams Engineering. Journal 11 (2020) 1201-1209.

[5] Bonapento, R., Manna, M., On the potential of the ideal diffuser augmented wind turbine: an investigation by means of a momentum theory approach and of a free wake ring-vortex actuator disk model. Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Napoli Federico II, Via Claudio 21, 80125 Naples, Italy.

[6] Suresh, A., Rajakumar, S. (2019) Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications. Materials today. India.

[7] Shirzadi, M., Tominga, Y. Y Mirzaei, P. (2020) Experimental study on cross-ventilation of a generic building in highly dense urban areas: Impact of planar area density and wind direction. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 196 104030.

[8] Sang, S. / Wen, Hao / Cao, A. X. / Du, X. R. / Zhu, X. / Shi, Q. / Qiu, C. H. (2020) Dynamic modification method for BEM of wind turbine considering the joint action of 43 installation angle and structural pendulum motion. Ocean Engineering,Vol. 215. Elsevier.

[9]] Rezaeiha, Abdolrahim / Montazeri, Hamid / Blocken, Bert. (2020) A framework for preliminary large-scale urban wind energy potential assessment: Roof-mounted wind turbines.

[10] Kumar, Rakesh / Raahemifar, Kaamran / Fung, Alan S. (2020). A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 89. Elsevier BV. p. 281-291.

[11] Leduox, J., Riflo, S. Salomon, J., (2020) Analysis of the Blade Element Momentum Theory. Tomado de: Analysis of the Blade Element Momentum Theory - Archive ouverte HAL (archives-ouvertes.fr).

[12] Smith, S. Travis, C. Djeridi, H. Obligado, M. Bayoan, R. (2020). Dynamic effects of inertial particles on the wake recovery of a model wind turbine. Renewable energy. 164(2021) 346-361.

[13] Manwell, J. F, Mcgowan, J. G., Rogers, A. J., Winnd Energy Explained.(2009). Segunda edición.

[14] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial W., Scott, G., (2009) Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500- 38060 February.

[15] M. L. Buhl and M. L. Buhl, “A New Empirical Relationship between Thrust Coefficient and Induction Factor for the Turbulent Windmill State A New Empirical Relationship between Thrust Coefficient and Induction Factor for the Turbulent Windmill State,” Tech. Rep. NREL/TP-500-36834, no. August, 2005.

[16] R. Lanzafame and M. Messina, “Advanced brake state model and aerodynamic poststall model for horizontal axis wind turbines,” Renew. Energy, vol. 50, pp. 415–420, 2013.

[17] R. Modarres et al., “Semi-Empirical Modeling of Two-Dimensional and Three Dimensional Dynamic Stall,” 2016.

[18] Davenport, A. G. (1977). Wind engineering—ancient and modern—the relationship of wind engineering research to design. Proceedings of the 6th CANCAM, Vancouver.

[19] Rafiee, R., Tahani, M., & Moradi, M. (2016). Simulation of aeroelastic behavior in a composite wind turbine blade. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 151, 60-69.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 7, Núm. 1, Enero – Junio 2024
ISSN: 2992-8338

Design and manufacture of open-circuit subsonic wind tunnel for airfoil testing

Jesús David Herrera Beltrán [*] **Eder Gibrain Ricoy Zárate** [*]
Rafael Campos Amezcua [*] **Horacio Martínez Valencia** [**]
Erik Rosado Tamariz [*]

[*] *TecNM, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México.*
MEX. TEL (+52) 235-115-3175; email m23ce143@cenidet.tecnm.mx
[**] *Instituto de Ciencias Físicas (ICF-UNAM), Cuernavaca, Morelos, México.*

Abstract: This paper shows the design process of an open-circuit subsonic wind tunnel for the analysis of the aerodynamic behavior of the airfoils present in wind turbine blades. In addition to this, its analysis is shown using numerical simulation based on Computational Fluid Dynamics techniques with the use of the OpenFoam open access software. With the results obtained by numerical simulation, the design generated in this paper is evaluated. In addition, the evaluation of the results obtained by means of an analytical method and CFD numerical simulation allows to verify data and to check that the open source software provides correct results.

Keywords: Diseño, Túnel de viento, Simulación numérica, OpenFOAM, Aerodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta experimental científica-tecnológica cuyo funcionamiento tiene como propósito el estudio de los efectos que tiene el flujo de aire sobre determinados objetos o cuerpos sólidos, es decir, con este dispositivo se simulan condiciones de tipo experimental del objeto que podrían llevarse a cabo en una situación real (Mejías (2012)). Una ventaja de utilizar túneles de viento es que los experimentos pueden realizarse en circunstancias de flujo controlado en comparación con los experimentos en entornos operativos (Mehta and Bradshaw (1979)).

Un punto importante a considerar es que la validez de los ensayos realizados en un túnel de viento en relación a los modelos a escala real requieren de semejanza geométrica, cinemática, y dinámica entre el flujo alrededor del modelo y el flujo alrededor del obstáculo real. Para que estas semejanzas ocurran se necesita principalmente de dos parámetros aerodinámicos relevantes, el número Mach [1] y el número de Reynolds (Álvarez Ochoa (2011)).

1.1 Clasificación de los túneles de viento de acuerdo a sus velocidades de operación

De acuerdo a Khan et al. (2021), los túneles de viento suelen agruparse en función de las velocidades de circulación del flujo a través la sección de prueba. Dentro de está clasificación han de distinguirse los siguientes tipos de túneles de viento:

(1) Túneles subsónicos: Velocidad igual o inferior a los 270 m/s (o 980 km/h). Es decir, están por debajo de Mach 0.8.
(2) Túneles transónicos: Mach 0.75 y Mach 0.9. Pueden traspasar la barrera del sonido y alcanzan un Mach 1.2, esto es, hasta 410 m/s o $1,230$ km/h.
(3) Túneles supersónicos: Mach 1.2 a Mach 5. A partir de esta velocidad, la del flujo de aire siempre es superior a Mach 1.
(4) Túneles hipersónicos: Superior a Mach 5 (Iberia (2023)).

Los túneles de viento subsónicos o de baja velocidad, como el que se analiza en este documento, son del tipo más utilizado (Celis and Ubbens (2016)).

1.2 Clasificación de los túneles de viento de acuerdo a su construcción

Con base a la forma de su construcción, los túneles de viento se dividen en dos tipos: de circuito abierto y de circuito cerrado. Los túneles de circuito cerrado requieren menos energía para mantener el flujo dado que recirculan el aire. Un túnel de circuito abierto requiere más potencia para mantener las mismas condiciones de flujo en estado estacionario, ya que el flujo no se recircula, sino que sale del túnel (Gonzalez Hernandez et al. (2013)).

De manera general, el tipo de túnel de viento que se decida construir depende de los recursos económicos y materiales que se dispongan para la puesta en marcha de un proyecto de este tipo, pero sobre todo, la aplicación que se le desea dar a tal equipo (Pope (1999)).

Para este caso en particular se elige un túnel de viento subsónico de circuito abierto, configuración que se carac-

[1] Relación entre la velocidad de un fluido y la del sonido en dicho fluido. Mach 1 equivale a la velocidad del sonido (Osma (2021)).

ISSN: 2992-8338

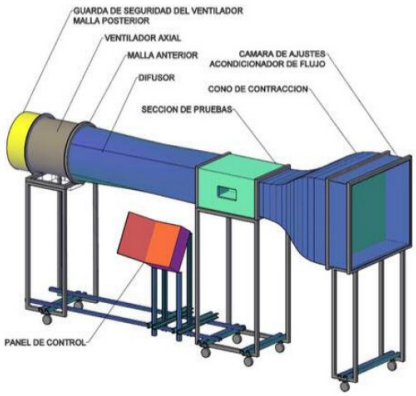


Fig. 1. Configuración típica de un túnel ve siento subsónico de circuito abierto (Molina (2012)).

teriza porque el flujo que sale del túnel no vuelve a recircular, razón por la cual también puede recibir el nombre de túnel de viento tipo soplador. En la Figura 1 se aprecia la estructura general de este tipo de túneles de viento.

1.3 Principales partes de un túnel de viento

Las partes o secciones principales en las cuales puede dividirse un túnel de viento para su correcto funcionamiento se describen en las líneas siguientes.

Cono de contracción (Figura 2): El cono de contracción se encarga de captar un volumen grande de aire a una baja velocidad y lo reduce a un volumen más pequeño incrementando la velocidad del flujo de aire sin la generación de turbulencia (Hernán (2010)).

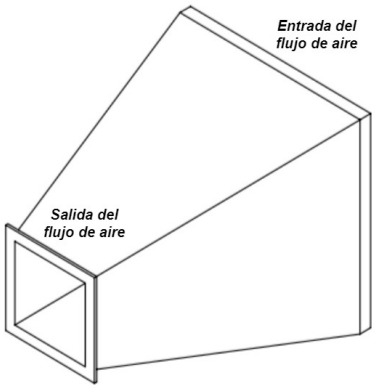


Fig. 2. Cono de contracción.

Cámara de pruebas (Figura 3): En este sitio es donde se colocan los modelos que serán analizados juntos los instrumentos de medición necesarios para el tipo de prueba que se desea realizar. El flujo en esta sección debe tener la mayor uniformidad posible. Para ello, se debe prestar atención a su longitud, es decir, tiene que ser lo suficientemente larga para que el modelo pueda ser adaptado lo más alejado posible de la entrada para evitar las irregularidades del flujo al inicio de la sección; pero si se excede, su longitud puede provocar el desprendimiento de la capa límite, por tal razón debe mantenerse una dimensión efectiva (Silva (2005)).

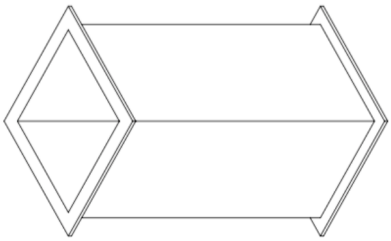


Fig. 3. Sección de pruebas.

Modelo de prueba: Se sabe que la circulación del flujo de aire se lleva a cabo en la sección de pruebas a la velocidad de trabajo que se ha preestablecido. Los instrumentos de medición acoplados al túnel de viento miden sobre el modelo de prueba parámetros tales como la velocidad, la presión, resistencia y sustentación. De acuerdo a los datos recabados de dichas fuerzas y la relación existente entre el ambiente de prueba y las condiciones reales, las predicciones exactas del funcionamiento del modelo a escala serán realizas con la mayor certitud posible.

Cono difusor (Figura 4): Este elemento se encarga de reducir la velocidad del flujo de aire a la salida del túnel de viento, se caracteriza por tener una longitud mayor a la del cono de contracción (Álvarez (2011)).

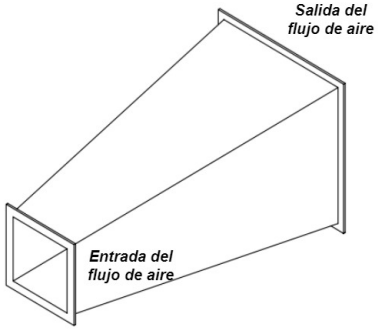


Fig. 4. Cono difusor.

Mecanismo impulsor: Es el encargado de proporcionar la fuerza necesaria para que el fluido se mueva a través de la geometría del túnel de viento. Por lo general, esta fuerza es obtenida a partir de ventiladores lo suficientemente grandes según las cantidades del fluido que se desean desplazar (Álvarez (2011)).

Reja pasiva (Figura 5): Este elemento se encarga de generar turbulencia en el interior de la geometría del túnel de viento, ya que como se mencionó anteriormente, los elementos de contracción y difusión modifican el comportamiento del fluido sin generar este efecto turbulento. La generación de turbulencia en el flujo de viento permite simular condiciones de operación más realistas para los modelos que serán analizados (Álvarez (2011)).

ISSN: 2992-8338

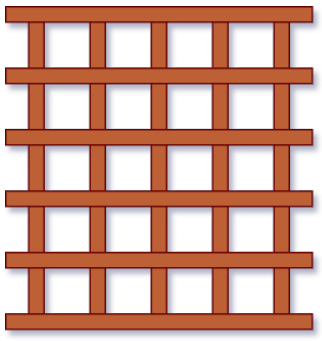


Fig. 5. Reja pasiva.

1.4 Estado del arte

Los avances realizados al día hoy relacionados al diseño y construcción de túneles de viento están enfocados directamente al estudio del comportamiento que tiene el flujo del fluido empleado como elemento para la evaluación aerodinámica de los modelos prototipados.

Por ejemplo, uno de los primeros estudios enfocados al modelado y entendimiento de la mecánica de fluidos de los túneles de viento fue el realizado por Wittwer and Möller (2000), quienes evaluaron las características del túnel de viento de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) para verificar su aplicabilidad a estudios de similitud y simulaciones experimentales de la capa límite atmosférica. Wittwer and Möller (2000) analizaron el comportamiento de la velocidad del flujo y la turbulencia presente en este mismo, concluyendo que en este tipo de dispositivos se tienen velocidades constantes con niveles ce turbulencia sumamente bajos.

En esa misma década, Boyle (2002) propuso un diseño de túnel de viento bajo incertidumbre de parámetros de diseño adecuados para túneles de viento. Para su caracterización utilizaron parámetros adimensionales (Número de Reynolds). Su estudio se enfocó en la generación de flujos laminares en la sección de prueba. Concluyeron que los factores de diseño geométrico tienen impacto en la velocidad del viento en las zonas de la sección de pruebas.

Wilson et al. (2008) realizaron un estudio en un túnel de viento enfocado hacia la medición de las fuerzas de las presiones y las velocidades del flujo de viento. La utilización de un túnel de viento garantiza la generación de un flujo laminar uniforme en la sección de prueba, lo cual resulta crucial para la obtención de resultados con alta precisión y confiabilidad. El túnel utilizado se caracterizó con una sección de prueba de 180 y 120 mm de diámetro. El modelo considera las características del flujo en la entrada del flujo de aire mediante el uso de números de Reynolds.

Los resultados obtenidos, con una precisión del 3% y un margen de error de ± 0.3 %, son bastante satisfactorios y proporcionan una base sólida para el diseño y la utilización del túnel de viento en aplicaciones posteriores. Esta precisión es adecuada para muchas aplicaciones de diseño y pruebas en las que se requiera un conocimiento detallado del comportamiento del viento.

Otro aporte importante el es de Huang et al. (2011). Estos autores presentaron el método *Fuzzified Eigensystem Realization Algorithm* (FERA), que se utiliza para realizar estimaciones en el conjunto de parámetros aerodinámicos. Esta metodología toma en consideración una variedad de variables en tipos de modelos y entorno de pruebas, como el perfil del modelo, el ángulo de ataque, el elevador, la velocidad del viento en el túnel y el sistema de potencia (motor y hélice). Con este tipo de técnicas numéricas se pueden obtener mejores modelados de túneles de viento para obtener condiciones de operación más aproximadas a la realidad del entorno.

Unos años más tarde, U-tapao and Moryadee (2018) mostraron una propuesta de diseño y construcción de un túnel de viento enfocado para el uso en laboratorios de ingeniería. El propósito de este estudio fue determinar los principios de diseño para el control de las velocidades del flujo de viento a través dicho túnel.

Estos autores establecieron las primeras características o propiedades geométricas adecuadas para la construcción de dicho tipo de equipos. Por ejemplo, determinaron que el difusor debe tener una longitud igual o superior al doble de la longitud de la prueba para evitar el flujo turbulento en la zona de prueba.

2. METODOLOGÍA

Como se comentó en la sección introductoria, la puesta en marcha de un proyecto de diseño y construcción de un túnel de viento dependerá también del sitio y espacio que se tengan disponibles para la instalación del mismo así como un presupuesto previamente determinado.

2.1 Diseño de componentes

Cono de contracción: Algunos autores, como Álvarez (2011) indican que el área de la zona de contracción debe ser de entre 3 y 10 veces el área de la zona de pruebas y el ángulo de inclinación no debe ser mayor a 30^o, esto determina la inclinación que debe tener el cono desde su entrada hasta su salida. Sin embargo, un modelo más aceptado es el propuesto por U-tapao and Moryadee (2018), quienes establecen que la longitud de la zona de contracción debe ser de 1 a 1.5 veces el diámetro de la entrada del flujo. Esto se resumen en la siguiente Ecuación.

$$D_h \leq L_c \leq 1.5F_h \tag{1}$$

donde:

- D_h es el diámetro de entrada.
- L_c es la longitud de la contracción.

En la Figura 6 se muestran los parámetros geométricos mencionados en la Ecuación anterior y en ecuaciones posteriores.

ISSN: 2992-8338

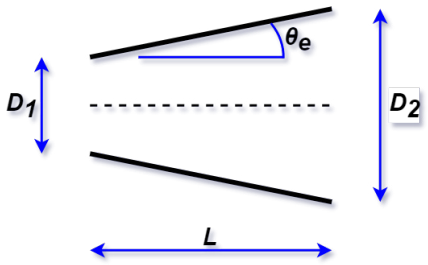


Fig. 6. Nomenclatura para los conos de contracción y difusor.

Relación de contracción U-tapao and Moryadee (2018) definen a la relación de contracción (C) como la relación entre el área de la sección transversal de entrada y el área de la sección transversal de salida. Estos autores establecen que un valor ideal para esta relación situarse entre 6 y 9.

$$6 \leq C \leq 9 \tag{2}$$

Sección de prueba: Para el caso de la sección de prueba, Ángel Munive Rojas; Noemi Corro Valdez (2014) indican que el correcto dimensionamiento de la sección de prueba evita el desprendimiento de la capa límite al sobre dimensionar tal elemento.

Para el dimensionamiento de este componente, U-tapao and Moryadee (2018) establecen que la sección de prueba debe contar con una relación entre su altura por el área de la sección transversal que está en un rango de 0.7 a 1 como sigue:

$$0.7 \leq \frac{H}{W} \leq 1 \tag{3}$$

donde

- H es la altura de la sección de prueba.
- W es el ancho de la sección de prueba.

Además de esto, se establece que la longitud de truncamiento para la sección de prueba será igual a:

$$L_T \geq 2D_h \tag{4}$$

donde

- L_T es la longitud de la sección de prueba.
- D_h el diámetro equivalente a la salida del cono de contracción.

Cono difusor: Valdera and Jesús (2011) mencionan en su obra que para parametrizar el difusor de manera óptima, es fundamental encontrar un equilibrio entre aumentar el área y evitar que la capa límite se desprenda. Esto se logra mediante la determinación de la relación de áreas de entrada y salida, o mediante el cálculo del ángulo equivalente de cono, que se obtiene al trazar un cono truncado entre el área de entrada y la de salida.

La relación de áreas recomendada generalmente no debe ser mayor de seis a uno, lo que significa que el área de salida no debería ser más de seis veces mayor que el área de entrada. Además, el ángulo del cono resultante debe ser de siete grados o menos. Estos parámetros ayudan a garantizar un flujo suave y eficiente a través del difusor, evitando la separación de la capa límite y minimizando las pérdidas de presión. U-tapao and Moryadee (2018) establecen que para el caso del cono difusor existe una relación óptima para el área de la sección de prueba (A_R). Esta relación se define como:

$$A_R = \frac{A_2}{A_1} \tag{5}$$

Además:

$$2 \leq A_R \leq \tag{6}$$

donde:

- A_2 es el área de sección de entrada del viento.
- A_1 es el área de la sección de salida del viento.

Ángulo de inclinación: Por lo general, el ángulo de inclinación θ_e se encuentra en el rango dado por:

$$\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1\sqrt{A_R^{-1}}}{2\frac{L}{D_1}}\right) \tag{7}$$

A partir de la Ecuación (7) y las consideraciones establecidas en las ecuaciones anteriores, se obtiene la siguiente simplificación:

$$2 \leq \theta_e \leq 3.5 \tag{8}$$

Diseño de la reja (reja pasiva): La anchura y la forma de la rejilla afectaban a la reducción del flujo turbulento. Por lo tanto, debemos seleccionar adecuada para el túnel de viento Valdera and Jesús (2011).

Para el caso de los elementos pasivos del túnel de viento (reja), no existen criterios firmemente definidos que rijan la construcción de ésta, ya que cada reja afecta en diferente forma al flujo de viento, añadiendo o disminuyendo la intensidad de turbulencia del flujo circulante.

A partir de los criterios y/o formulaciones matemáticas para la caracterización geométrica de los túneles de viento subsónico de circuito abierto que se describieron anteriormente, se generó un diseño propio considerando las limitaciones de espacio del laboratorio en el cual habría de instalarse dicho equipo (Laboratorio de Espectroscopia perteneciente al Instituto de Ciencia Físicas).

Además de esto, se consideraron otras condiciones tales como el tipo de instalación eléctrica del laboratorio,esto para determinar las características eléctricas del mecanismo impulsor que podría ser utilizado para el funcionamiento del túnel de viento. Para el modelo presentado en este documento se seleccionaron las dimensiones indicadas en la Tabla. 1

Table 1. Dimensiones para el túnel diseñado.

Elemento	Dimensiones	
Cono de contracción	Lado	0.28084 m
	Longitud	0.17652 m
Sección de prueba	Lado	0.194 m
	Longitud	0.40 m
Cono difusor	Lado	0.28084 m
	Longitud	0.17652 m

ISSN: 2992-8338

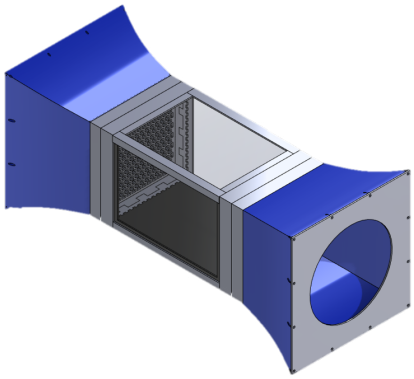


Fig. 7. Diseño de túnel de viento en software CAD.

2.2 Análisis numérico

Una vez que se han ya determinado las características geométricas del prototipo diseñado es necesario conocer el comportamiento que habrá de tener el flujo de aire al circular a través de la geometría del túnel de viento propuesto, ya que a partir de este análisis habrá de determinarse el mecanismo impulsor del fluido (ventilador) que satisfaga correctamente los requerimientos para el tipo de pruebas a realizar en éste.Para el análisis numérico del comportamiento del flujo de viento a través de las secciones del túnel de viento se ha seleccionado un método meramente analítico tomando como referencia el principio de conservación de la masa formulado por Antoine Lavoisier. Dicha ley establece que para toda reacción química la suma de la masa de los reactivos es igual a la suma de la masa de los productos (Arias (2015)). En otras palabras:

$$m_1 = m_2 \tag{9}$$

La Ecuación (9) se modifica a términos de flujo tomando en consideración la equivalencia de flujo másico:

$$\dot{m} = \rho V A \tag{10}$$

donde:

- $\dot{m}$: Flujo másico en $\frac{kg}{s}$.
- V: Velocidad del flujo en $\frac{m}{s}$.
- A: Área en m^2.

Conjuntando las Ecuaciones (9) y (10) se obtiene:

$$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \tag{11}$$

Como se considera que el túnel operará a valores de velocidad subsónica, y con valores que realmente son bajos en comparativa con la velocidad del sonido, se considera que el flujo de aire a través del túnel de viento tendrá un comportamiento incompresible. Por tanto, en la Ecuación 11 el término de la densidad del aire se elimina obteniéndose así la Ecuación de continuidad:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \tag{12}$$

Con la Ecuación anterior es posible predecir la velocidad del flujo de aire en la sección de prueba a partir de las condiciones geométricas y de flujo presentes en la entrada del cono de contracción del túnel de viento. A modo de ejemplo, y para tener un caso de estudio de referencia para el comportamiento del flujo de aire, se supone que se alimenta el cono de contracción con una velocidad de 3.5 m/s, valor que corresponderá a la velocidad en el punto 1 para la Ecuación (12). Con estos datos y las referencias geométricas proporcionadas por la Tabla 1 se tiene que la velocidad en la sección de prueba será igual a:

$$V_2 = \frac{V_1 A_1}{A_2} = \frac{(3.5\ \frac{m}{s})(0.28084\ m)^2}{(0.194\ m)^2} = 7.3347\ \frac{m}{s}$$

2.3 Simulación numérica CFD

Una vez que se ha generado una solución mediante una metodología analítica, se procedió a evaluar el comportamiento del flujo de viento a través del diseño generado utilizando técnicas de simulación numérica basadas en la Dinámica de Fluidos computacional. Un punto importante para saber que tipo de simulación realizar es analizar el tipo de fenómeno que se está estudiando. Como se trata de una geometría con secciones casi regulares, y no se está considerando la presencia de objetos al interior del túnel de viento, se establece que ha de realizarse una simulación en régimen estacionario.

Como se mencionó al inicio de este documento, se optó por el uso de software de código abierto, tanto para la generación de los modelos CAD y las mallas a utilizar, como para el proceso de cálculo y visualización de los resultados obtenidos.Para el caso de la generación de la geometría y la malla a utilizar se utilizó el software SALOME [2] . Y para el caso del procesamiento y posprocesamiento de las simulaciones realizadas se seleccionó el software OpenFOAM [3] .

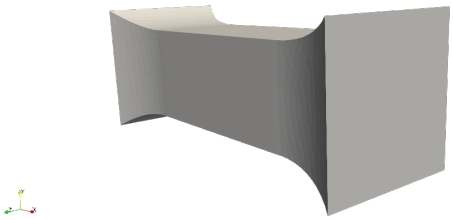


Fig. 8. Geometría generada para simulación numérica CFD.

Se generó un caso de estudio similar al mostrado en la sección 2.2, es decir, con condiciones de velocidad de viento a la entrada del cono de contracción de 3.5 m/s. Una vez realizada la simulación de dicho caso de estudio planteado se obtuvieron los resultados mostrados en las Figura 9 y 10.
Analizando los resultados obtenidos se analiza el valor medido en la simulación numérica en la parte central de la sección de prueba, indicando un valor de velocidad de 7.3945 m/s. Para determinar el grado de similitud entre los resultados obtenidos mediante el método analítico y los obtenidos mediante simulación numérica se aplica la ecuación para determinar el error porcentual.

$$Error = \left| \left(\frac{Valor\ calculado - Valor\ medido}{Valor\ calculado} \right) \times 100 \right| \tag{13}$$

[2] https://www.salome-platform.org/
[3] https://www.openfoam.com/

ISSN: 2992-8338



Fig. 9. Contornos de presión del túnel de viento diseñado (Vista seccionada).

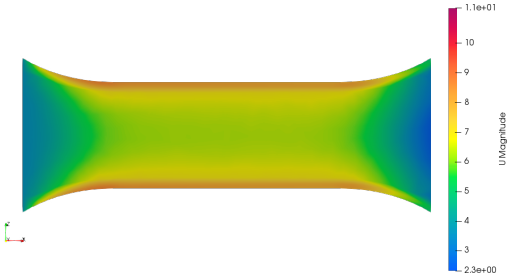


Fig. 10. Contornos de velocidad del túnel de viento diseñado (Vista seccionada).

Al aplicar la Ecuación 13 se obtiene:

$$Error = \left| \frac{7.3347 - 7.3945}{7.3347} \times 100 \right| = 0.815\%$$

Con el valor determinado anteriormente se establece entonces que los resultados de la simulación numérica y los del método analítico tienen una diferencia prácticamente despreciable.

3. RESULTADOS

Con los resultados obtenidos mediante simulación numérica y el método analítico determinado, se aprecia que el diseño generado del túnel de viento subsónico logra aumentar la velocidad del flujo de viento y además, hacer que el flujo tenga un comportamiento laminar y estable. Ahora bien, como el prototipo mostrado será utilizado para la evaluación de modelos de perfiles aerodinámicos presentes en los álabes de aerogeneradores, es necesario determinar los requerimientos de operación adecuados para tal propósito. De acuerdo a Manwell et al. (2011), el estudio aerodinámico de los aerogeneradores suele realizarse con velocidades que van desde los 4 hasta los 25 m/s, tomando como referencia la curva típica de potencia para este tipo de dispositivos. Determinado este rango de operaciones, y haciendo uso de los métodos numéricos planteados en la sección anterior, se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 2.

A partir de los resultados obtenidos y plasmados en la Tabla 2, y con base a los criterios establecidos por Manwell et al. (2011), se llega a la conclusión que para la aplicación que se desea dar al diseño de túnel de viento propuesto en este documento será necesario seleccionar un ventilador que permita operar en un rango de velocidades de 1 a 13 ms.

Table 2. Relación entre velocidad de entrada al cono de contracción y la velocidad en la sección de pruebas del diseño propuesto.

Velocidad a la entrada del cono de contracción (m/s)	**Velocidad en la sección de prueba** (m/s)
1	2.095
2	4.191
3	6.286
4	8.382
5	10.478
6	12.573
7	14.669
8	16.765
9	18.860
10	20.956
11	23.051
12	25.147
13	27.243
14	29.338
15	31.4344
16	33.530
17	35.625
18	37.721

Con datos como los plasmados en la Tabla 2 se podrán seleccionar los mecanismos impulsores de acuerdo a las necesidades que se tengan, las cuales a su vez dependerán del tipo de pruebas que se deseen realizar en el túnel de viento.

3.1 Manufactura del diseño generado

Una vez que el diseño generado ha sido ya evaluado mediante métodos analíticos y simulación numérica CFD, se procede a la manufactura de dicho prototipo. La tarea de manufactura de este equipo se realizó implementando técnicas de manufactura aditiva (impresión 3D) y maquinado de corte láser CNC. Los materiales empleados para tal etapa del proyecto realizado fueron filamento PLA de 0.75 mm, madera tipo MDF de 3 mm de espesor y acrílico transparente con espesor de 3 mm. El resultado final de dicho proceso de manufactura se muestra en la Figura 11.



Fig. 11. Túnel de viento manufacturado.

4. CONCLUSIONES

A modo de conclusión podemos decir en primera instancia que los túneles de viento representan una herramienta invaluable para la investigación, la innovación y el desarrollo

ISSN: 2992-8338

en una amplia gama de industrias. Su capacidad para proporcionar datos precisos y reproducibles en un entorno controlado ayuda a impulsar el progreso tecnológico y a mejorar la eficiencia y la seguridad de los productos y sistemas que utilizamos en nuestra vida diaria.

Además, y con base en lo realizado en el presente documento notamos que es posible la generación de diseños propios que sean funcionales y que se adecúen correctamente a las necesidades que se tengan por parte de los investigadores que pongan en marcha la creación de este tipo de dispositivos. Dentro de estas necesidades se pueden mencionar por ejemplo los espacios disponibles y los requerimientos de operación del prototipo diseñado.

En el presente documento se ha mostrado la generación de un diseño creado con el propósito de evaluar el comportamiento aerodinámico de perfiles presentes en aerogeneradores. Mediante estas pruebas aerodinámicas se da la pauta a comprender en mejor manera el comportamiento del viento a través de la geometría del mismo y se da la pauta a la generación de diseño propios que tengan un desempeño aerodinámico superior. Aunado a esto, se logró mediante la aplicación de métodos analíticos y el uso de técnicas de Dinámica de Fluidos computacional, evaluar el comportamiento que tendrá el flujo de viento al circular a través de los elementos diseñados.

Otro punto de suma importancia es que al utilizar herramientas basadas en software de código abierto, se generan casos de estudios que permiten consolidar y demostrar que el uso de este tipo de programas computacional ofrecen resultados que pueden ser verificados y/o validos. Para este caso en particular las tareas de verificación ha sido ya realizadas.

AGRADECIMIENTOS

Se extiende un agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado a través del programa de becas para estudios de posgrados. A través del recurso financiero otorgado por tal programa fue posible la compra de los materiales y equipos necesarios para la fabricación del prototipo de túnel de viento diseñado.

REFERENCES

Arias, M.J.D. (2015). Ley de lavoisiser. resreport, Universität de Valencia.

Boyle, M. (2002). Low speed wind tunnel testing.semiconductor thermal andtemperature measurement symposium. resreport, SEMI-THERM IV Fourth Annual IEEE.

Celis, B. and Ubbens, H.H. (2016). Design and construction of an open-circuit wind tunnel with specific measurement equipment for cycling. *Procedia Engineering*, 147, 98–103. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.196.

Gonzalez Hernandez, M.A., Moreno Lopez, A.I., A., A., Perales Perales, J.M., Wu, Y., and Xiaoxiao, S. (2013). *Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel*. InTech. doi:10.5772/54169.

Hernán, P.M.D.P.V.S.W. (2010). Diseño y construcción de un túnel de viento subsónico con sistema de adquisición de datos para el estudio de la aerodinámica de los vehículos. candthesis, Escuela Politécnica del ejército, Quito, Ecuador.

Huang, C.H., Lin, C.L., and Chao, M.J. (2011). Fera in parameter identification with application in low speed wind tunnel test. *Aerospace Science and Technology*, 15(6), 495–509. doi:10.1016/j.ast.2010.10.002.

Iberia (2023). Subsónica, transónica, supersónica, hipersónica: ¿qué indican estas velocidades? techreport, Iberia airline.

Khan, D., Holm Bjernemose, J., Lund, I., and Elkjær Bebe, J. (2021). Design and construction of an open loop subsonic high temperature wind tunnel for investigation of scr dosing systems. *International Journal of Thermofluids*, 11, 100106. doi:10.1016/j.ijft.2021.100106.

Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L. (2011). *Wind energy explained*. Wiley, Chichester, 2. ed., repr. with corr. edition. Includes bibliographical references and index.

Mehta, R. and Bradshaw, P. (1979). Design rules for small low speed wind tunnels. *The Aeronautical Journal*, 83(827), 443–453. doi:10.1017/s0001924000031985.

Mejías, A.M. (2012). *Diseño y análisis computacional para túnel de iento de baja velocidad*. Master's thesis, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID: ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR.

Molina, F.E.C. (2012). Diseño y construcción de un túnel de viento. candthesis, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

Osma, M.F. (2021). ¿qué es el número de mach? techreport, Aerodinámica F1.

Pope, J.B.B.W.H.R.A. (1999). *Low-speed wind tunnel testing*. 1. John Wiley & Sons Inc., 3 edition.

Silva, C.J. (2005). *Diseño y construcción de un túnel de vientobidimensional subsónico de circuito abierto porinyección*. mathesis, Universidad de Colima.

U-tapao, C. and Moryadee, S. (2018). A design and construction of a wind tunnel for engineering laboratories. *MATEC Web of Conferences*, 192, 02069. doi:10.1051/matecconf/201819202069.

Valdera, S.G.C..J.C. and Jesús, W.U. (2011). *Cálculo, diseño y construcción de un túnel de viento para estudios experimentales de aerogeneradores y sus componentes*.

Wilson, C., Camilletti, A., Calcutt, S., and Ligrani, P. (2008). A wind tunnel for the calibration of mars wind sensors. *Planetary and Space Science*, 56(11), 1532–1541. doi:10.1016/j.pss.2008.05.011.

Wittwer, A.R. and Möller, S.V. (2000). Characteristics of the low-speed wind tunnel of the unne. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84(3), 307–320. doi:10.1016/s0167-6105(99)00110-5.

Álvarez, J.P. (2011). Diseño y construcción de túnel de viento para ensayos aerodinámicos.

Álvarez Ochoa, J.P. (2011). *Diseño y construcción de un túnel de viento para ensayos aerdinámicos*. Master's thesis, Facultad e Mecánica Automotriz. UIDE.

Ángel Munive Rojas; Noemi Corro Valdez, P.M.G.B.D.C.A.S.C.J.M.C.V.M. (2014). Diseño y manufactura de túnel de viento subsónico dec ircuito abierto. *Científica ESIME*, 18(3), 6.

ISSN: 2992-8338

Appendix A. VISTAS ADICIONALES DEL TÚNEL DE VIENTO DISEÑADO

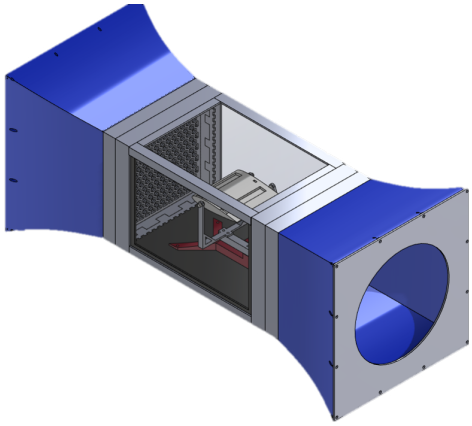


Fig. A.1. Vista isométrica del modelo de túnel de viento diseñado (Vista ejemplificada con una prueba aerodinámica).



Fig. A.2. Vista frontal del modelo de túnel de viento diseñado (Vista ejemplificada con una prueba aerodinámica).

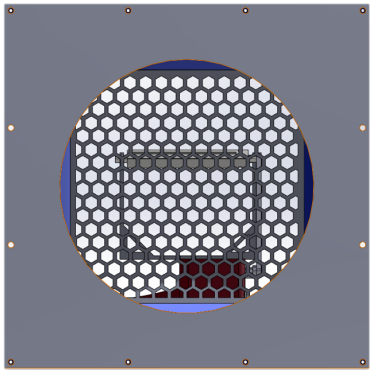


Fig. A.3. Vista a través de la sección de entrada del modelo de túnel de viento diseñado (Vista ejemplificada con una prueba aerodinámica).

REDES SOCIALES
TecNM / CENIDET

@TecNMCENIDET.MX

Cenidet

Cenidet_oficial

CENIDET

http://cenidet.tecnm.mx/

cenidet®
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico