



INNOVACIÓN SUSTENTABLE: IA AL SERVICIO DEL PLANETA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

CONTENIDO

Adaptación de Dominio en Imágenes para una Mejor Detección de Espigas de Trigo	10
Jesús Eduardo Salas Ibañez, Gamaliel Moreno Chávez	
Estudios del pluriverso en el campo del diseño, importancia del tema desde 2015	19
Jorge Andrés Flores Montero	
Evaluación numérica de un sistema de microfiltración de fluidos por fuerzas inerciales	27
José Fernando Cerda Saavedra, Christopher René Torres San Miguel	
Integración de Análisis de Segundo Orden en Estructuras Mediante Modelo JSON de SKYCIV	35
Josué B. E. Elizondo Gómez	
Optimización de armadura tipo puente mediante métodos metaheurísticos	42
Juan Manuel Hernández Martínez, Alejandro Ibarrola Pacheco, José Luis Pérez Martínez	
Optimización del sistema semafórico para reducir el tráfico vehicular mediante un microsimulador	50
Julio Cesar Carrasco Morales	

Análisis de redes semánticas naturales en la virtualidad: Tendencias de búsqueda referentes a la arquitectura	58
Karen de los Angeles Cruz Ríos, Avatar Flores Gutiérrez	
Efecto del exceso de carga en camiones pesados en las distancias de frenado	66
Liliana Guzmán Burelos, Omar Chávez alegría	
Acciones de mejoras en la eficiencia energética basado en la ISO 50 001:2018.	
Un caso de estudio del sector hotelero	73
Luis Angel Iturral de Carrera, Yarelis Valdivia Nodal, Juvenal Rodríguez Reséndiz,	
José Manuel Álvarez Alvarado, Reinier Jiménez Borges, Cinthya	
Alejandra Zúñiga Castillo	
Chitosan as a vehicle in slow-release systems: structure, function and application	81
Margarita G. Garcia Barajasa, Juan de Dios Galindo de la Rosa, Angélica Feregrino Perez,	
Alejandra Álvarez López, Vanesa Vallejo Becerra	
Identificación de fitoquímicos de interés terapéutico en <i>Tradescantia zebrina</i> para su incorporación a nanopartículas de quitosano	85
Elvira Valencia Gil, Ma. Guadalupe Ferreira García, Miriam Estévez González	

Clasificación automática de pacientes con COVID19 mediante procesamiento de imágenes radiográficas: comparativa de modelos IA	91
Rafael Eduardo Velasco Cerros, Juan Pablo Amézquita Sánchez, Daniel Jaramillo Quintanar	
Toma de decisiones, sesgos y heurística en el proceso de diseño arquitectónico	99
Midory Maythe Liahut Caraveo, María Esther Magos Carrillo	
Relación del índice de rugosidad y pendiente de vialidad urbana con el consumo de combustible	107
Miguel Moreno Barrón, Ricardo Montoya Zamora	
Inteligencia Artificial Aplicada a la Detección de Glaucoma en Tomografías de Coherencia Óptica: Una Revisión	113
Oliverio Castillo Rocha, Gendry Alfonso Francia, J. Oliver Quintana-Quintana	
Polímeros Hidrofóbicos en Asfaltos Modificados: Revisión de Estudios y Perspectivas de Aplicación	121
Orlinka Yine Vizcaino Rodríguez	
Detección de corrosión en rodamientos de motores de inducción usando aprendizaje automático y fusión de datos	129
J Pablo Pacheco Guerrero, Israel Zamudio Ramírez, Roque Alfredo Osornio Rios, Jose Antoino Daviu	

Técnicas didácticas y sus objetivos pedagógicos para la enseñanza-aprendizaje de la arquitectura	137
Paola Barragán Vargas, Avatar Flores Gutiérrez, Guillermo Iván López Domínguez	
Adquisición de base de datos para entrenamiento de algoritmo de Deep Learning para sistema ADAS	145
Victor Jose Ortiz Granados, Salvador Martínez Cruz, Oscar David de Jesús Días	
Optimización de Armaduras para Nave Industrial mediante Algoritmos Enjambre de Peces Artificiales y Búsqueda Armónica	152
Risieri Rafael Ponce Olguín, Emiliano Ponce López	
El valle inquietante aplicado al espacio arquitectónico	160
Samantha Athenas Villalobos Guzmán, Guillermo Iván López Domínguez	
Variación de contenido asfáltico en mezcla asfáltica con la incorporación de mineral carbonatado de Colombia	168
Susana Torres González, Teresa López Lara, Ricardo Montoya Zamora, Jaime Moisés Horta Rangel, Juan Bosco Zaragoza Hernández, Gloria María Restrepo Vásquez, Jorge Armando Castro Escudero.	
Sueños y realidades. Contradicciones entre la publicidad y la construcción de residenciales en el Bajío	174
Verónica Béjar González	

Tendencias Globales en Metodologías Ágiles: Un Estudio Sistemático en Sectores más allá de la industria de <i>Software</i>	179
Victor Ernesto Montalvo Garfias	
Adaptaciones estructurales actuales entre vigas de madera y concreto: una revisión	187
Victor Hugo Queb Paz	
Propuesta metodológica para la aplicación de BIM en la Gestión de Activos Viales	195
Agustín Sánchez Olguín, José Ricardo Solorio Murillo, Ricardo Montoya Zamora	
Simulación de microplásticos inmersos en agua dentro de un circuito Lab-On-a-Chip	203
Alejandro Rojas Agustin, Christopher René Torres San Miguel	
Caracterización de los refuerzos en el tapial para muros (RE): Revisión sistemática	210
Aminta Reyes Barragán, Teresa López Lara, Gerardo Medellín Aguilar, Jaime Moisés Horta	
Reemplazo Parcial del Cemento en Concretos con Materiales Alternativos: Una Revisión de la literatura	218
Anahi Santiago Bautista, Juan Bosco Hernández Zaragoza, Ricardo Montoya Zamora, Jaime Moisés Horta Rangel	

**Integración Filosófica y Tecnológica en la Arquitectura Conceptual: Sinergia entre
Inteligencia Artificial y el Pensamiento** **226**

Ariel Amador León, Guillermo Iván López Domínguez

**Revisión de Técnicas de Aprendizaje Automático en el Procesamiento de señales
Mioeléctricas** **234**

Carlos Alberto Bacilio Díaz, Andras Takacs

**Análisis de las características de los electrodos para
sistemas de puesta a tierra eléctricos** **239**

Cesar Augusto Navarro Rubio, Mario Trejo Perea, José Gabriel Ríos Moreno, Roberto Valentín
Carrillo Serrano

**Revisión literaria sobre la gentrificación comercial de los mercados tradicionales
en ciudades turísticas** **247**

Damarix Sarai Murillo Cuevas, Avatar Flores Gutiérrez, David Navarrete Escobedo,

**Detección automática de cortocircuito entre espiras en transformador seco me-
diante fujo magnético de dispersión y análisis de indicadores estadísticos** **255**

Picaz Cruz Ramírez, D., Zamudio Ramírez, I., Osornio Ríos, R.A., Daviu, J.A

**Herramientas etnográficas para un entendimiento
regenerativo del lugar** **263**

Danilo Daniel García Hernández, Miguel Angel Bartorila

Propuesta de diseño de inteligencia artificial para potencial determinación de analitos simultánea en sudor humano	271
Estrada-Osorio, D.V.	
Influencia de Parámetros de Síntesis en la Dimensionalidad de la Sílice Mesoporo-rosa SBA-15	279
Ed Fabián Sánchez Ramírez, María de los Ángeles Cuán Hernández, Rufino Nava Mendoza, Luz M. López, Rodrigo Marín Díaz Díaz	
Feature generation with genetic algorithms for imagined speech EEG signal classification	287
Edgar Lara, Juvenal Rodríguez, Saúl Tovar, Andras Takacs	
TEEN: Encoder para series de tiempo multivariadas con diferente frecuencia	295
Edgar Adrian Quiroz Calvillo, Luis Roberto García Noguez	
Diseño de una bomba de desplazamiento para microfluidos	303
Elías Jiménez Bautista, Christopher René Torres SanMiguel	
Redes Neuronales en la automatización del análisis estático sísmico regional para edificaciones de mediana altura	309
Enrique Avila Nieto, Jaime Moisés Horta Rangel, Luis Francisco Pérez Moreno, Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, Enrique Rico García	

Modelado y Control de un Convertidor Puente H para Motores de Corriente Continua de Imanes Permanentes	317
Ernesto Molina Santana, José Emmanuel Romero Maldonado	
Comparativa granulométrica y comportamiento de finos de pétreos de origen natural y reciclados de concreto.	325
Flor María de los Ángeles González Porta, Juan Bosco Hernández Zaragoza	
Mezcla asfáltica reducida en asfalto adicionada con polietileno de baja densidad por el método seco	385
Emmanuel Estrada Anaya, Teresa López Lara, Jaime Horta Rangel, Juan Bosco Hernández Zaragoza y Danae Alejandra Vilchis Hernández	

Adaptación de Dominio en Imágenes para una Mejor Detección de Espigas de Trigo

Domain Adaptation in Images for a Better Wheat Head Detection

Salas Ibañez, Jesús Eduardo; Moreno Chávez, Gamaliel
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica
Universidad Autónoma de Zacatecas
Zacatecas, México
eduardo.si@uaz.edu.mx

Palabras clave: IAR, espigas de trigo, adaptación de dominio, detección de objetos, visión por computadora, aprendizaje profundo.

Resumen- La densidad de espigas es un componente importante a la hora de determinar la cosecha de trigo. Por esta razón, se ha propuesto estimarla mediante un conteo automático de las espigas de trigo en imágenes a color, tarea en la cual los modelos de redes neuronales para detección de objetos han demostrado gran capacidad. Sin embargo, estos modelos pueden enfrentar problemas para identificar correctamente las espigas cuando existe mucha variación visual en su aspecto en distintas imágenes. Este trabajo presenta una forma de atacar este problema mediante la aplicación de un algoritmo de adaptación de dominio basada en transporte óptimo, con el cual se puede cambiar la paleta de colores de una imagen para que sea visualmente más parecida a otra, reduciendo así parte de esta variación visual. Al aplicar este algoritmo a las imágenes de la base de datos Global Wheat Head Detection 2021, se encontró que se puede aumentar el mAP50 de un modelo YOLOv5s hasta en un 4.1%, lo cual muestra el potencial que tienen las técnicas de adaptación de dominio en la mejora del desempeño de un modelo de detección de objetos.

Keywords: IAR, wheat heads, domain adaptation, optimal transport, object detection, neural networks.

Abstract- Spike density is an important parameter when determining the wheat yield. For this reason, it has been proposed to estimate it through the automatic counting of wheat heads in color images, a task in which object detection neural network models have demonstrated great capability. However, these models may face difficulties in correctly identifying wheat heads when there is significant visual variation in their appearance across different images. This work presents a way to address this issue by applying a domain adaptation algorithm based on optimal transport, which allows for changing the color palette of an image to make it visually more similar to another one, thereby reducing part of this visual variation. By applying this algorithm to the images from the Global Wheat Head Detection dataset 2021, it was found that the mAP50 of a YOLOv5s model can be increased by up to 4.1%, demonstrating the potential of domain adaptation techniques in improving the performance of an object detection model.

1. Introducción

El trigo posee un rol estratégico en la seguridad alimentaria mundial ya que es el cultivo más extendido en el mundo, con un estimado de 216 millones de hectáreas de área

sembrada en 2019 y una producción anual por país de más de 10000 toneladas. Sin embargo, en los siguientes años, la producción de trigo se verá desafiada a consecuencia del cambio climático, por lo que la adopción de nuevas tecnologías en esta área representa una

oportunidad para enfrentar estos retos y asegurar una producción sustentable [1].

El número de espigas por unidad de área o densidad de espigas es uno de los componentes agronómicos más importantes a la hora de determinar la cosecha de grano en el trigo [2]. Identificar las espigas mediante un conteo manual en el campo es un proceso lento y propenso a errores, por lo que las tecnologías de visión por computadora proporcionan una alternativa para hacer más viable esta tarea y además pueden asistir en el monitoreo del crecimiento del trigo en tiempo real [3]. Las imágenes a color de alta resolución, que pueden ser obtenidas a partir de cámaras digitales, permiten evaluar a detalle la estructura y textura de las plantas. El procesamiento de estas imágenes, principalmente con la introducción de las redes neuronales artificiales, ha tenido un impacto significativo en la automatización del monitoreo de los cultivos en años recientes [4].

De acuerdo a revisiones de artículos sobre el uso de técnicas de inteligencia artificial en la predicción de cosechas [5] y conteo de plantas [6], existen algunos estudios que utilizan técnicas de extracción de características de color, textura y morfología junto a algoritmos clásicos de machine learning como regresión lineal, bosques aleatorios o máquinas de vectores de soporte. Sin embargo, algunos de estos estudios citaban la poca disponibilidad de datos y la poca variación en las condiciones de obtención de estos como algunos de sus principales problemas, por lo que el desarrollo reciente de bases de datos más extensas y variadas, así como la disponibilidad de mejores GPUs, han causado un cambio en el enfoque de este tipo de investigaciones hacia el uso de redes neuronales. En este sentido, las redes neuronales convolucionales (CNN) han destacado sobre las demás, principalmente con arquitecturas como RCNN, YOLO, SSD, EfficientDet, entre otras.

A pesar de la ventaja que suponen las técnicas basadas en tecnologías de visión por computadora, su uso para la identificación de espigas de trigo presenta múltiples obstáculos, entre los que se encuentran la variación de tamaño, forma y textura de las espigas, las distintas condiciones de iluminación en las imágenes, o la oclusión total o parcial de algunas espigas debida a la presencia de otras [3].

Para que un modelo de redes neuronales pueda superar los obstáculos antes mencionados e identificar de manera eficiente las espigas, es necesaria una base de datos que contenga imágenes que contemplen todas estas situaciones, incluyendo distintas variedades de trigo, etapas de desarrollo de la planta y condiciones de adquisición de las imágenes. Con este fin, [7] introdujo la base de datos Global Wheat Head Detection (GWHD), la cual en su versión 2021 contiene imágenes de espigas de trigo proporcionadas por 16 instituciones de 12 países y tiene como objetivo servir de punto de referencia para evaluar el desempeño de algoritmos en la tarea de identificación de espigas. Esta base de datos fue creada a partir del Global Wheat Challenge (GWC) en donde se buscaba los modelos de redes neuronales con mejor desempeño para la detección de espigas, siendo la red YOLOv5 la arquitectura más popular entre las soluciones ganadoras de la edición 2021 [8].

Las redes neuronales entrenadas en un cierto dominio pueden tener un desempeño reducido cuando son aplicadas a otro dominio, siendo este un problema relevante en el contexto de las plantas debido a que pueden existir cambios de dominio dentro de bases de datos de plantas de una misma especie, debidos principalmente a las diferencias en el equipo y las ubicaciones en que se tomaron las imágenes, la época del año, edad de la planta, entre otras. Por estas razones, los métodos de adaptación de dominio son utilizados para alterar las imágenes de entrenamiento para que

coincidan de mejor manera con un dominio objetivo, mejorando así el desempeño en las imágenes de prueba [9].

En este trabajo, se presenta una metodología de adaptación de dominio basada en la teoría de transporte óptimo, con la cual se pretende homogeneizar la distribución de colores en las imágenes de la base de datos GWHD 2021 para incrementar el desempeño del modelo YOLOv5s en la detección de espigas de trigo.

2. Metodología

2.1 Descripción de las imágenes

Las imágenes utilizadas para este análisis corresponden a las de la base de datos GWHD 2021 [5], la cual consta de 6515 imágenes a color, divididas en 3657 imágenes para el entrenamiento del modelo, 1476 para la validación y 1382 para pruebas. Esta base de datos se divide en 47 sub bases de datos o “dominios”, donde cada uno de ellos corresponde a un conjunto de imágenes adquiridas en la misma unidad experimental, durante la misma sesión de adquisición y con el mismo sensor. En la (Fig. 1) se puede observar un gráfico de la distribución de estos dominios de acuerdo a la etapa de desarrollo en que se encuentran las plantas que aparecen en las imágenes.

Durante la investigación se asumió que dentro de un dominio existe una distribución de colores similar en todas las imágenes, por lo que la adaptación de dominio se abordó como un cambio en esta distribución de colores en las imágenes de un dominio de origen, con el objetivo de que se parezcan a la distribución de colores de un dominio objetivo. Este proceso se abordó mediante un código de Python basado en un ejemplo del paquete “GeomLoss” [10], en el cual se aborda la transferencia de color con transporte óptimo (OT, por sus siglas en inglés) haciendo uso de la GPU.

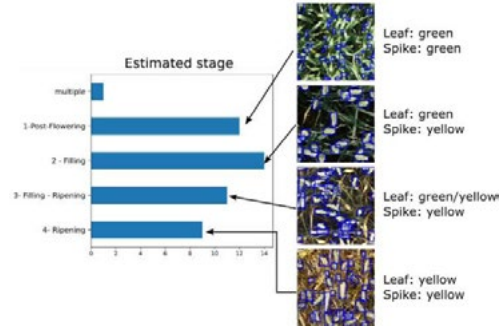


Figura 1. Distribución de los dominios de la base de datos y características de sus imágenes [7].

2.2 Planteamiento del problema de OT para la adaptación de dominio

El OT es un área de las matemáticas que tiene como objetivo resolver el problema de encontrar la manera más eficiente de transformar una distribución de masas en otra, relativo a una función de costo dada [11]. Sea $\Omega \in \mathbb{R}^d$ un espacio medible de dimensión d , $P(\Omega)$ denota el conjunto de todas las medidas de probabilidad sobre Ω . Si Ω_s y Ω_t son un dominio de origen y un dominio objetivo respectivamente y X son los elementos de Ω , entonces se consideran μ_s y μ_t como sus respectivas distribuciones marginales sobre X [12]. También se considera una transformación no lineal del espacio de entrada $T: \Omega_s \rightarrow \Omega_t$, la cual transforma la medida μ en su medida imagen denotada por $T_{\#}\mu$, que es otra medida de probabilidad sobre Ω_t , y que satisface la condición

$$T_{\#}\mu(x) = \mu(T^{-1}(x)), \quad \forall x \in \Omega_t(1)$$

En la Ec. (1), T es llamado el mapa de transporte de μ_s a μ_t si $T_{\#}\mu_s = \mu_t$. Para encontrar T , se propuso que éste minimice el costo del transporte $C(T)$, el cual se puede expresar mediante

$$C(T) = \int_{\Omega_s} c(x, T(x)) d\mu(x) (2)$$

donde la función de costo $c: \Omega_s \times \Omega_t \rightarrow \mathbb{R}^+$ en la Ec. (2) es una función de distancia sobre el espacio métrico Ω [12].

A diferencia de lo planteado por la Ec. (2) en las imágenes se considera un OT discreto, por lo que, de acuerdo a Feydy et al. [10], se definen dos medidas de probabilidad discretas α y β en el espacio RGB $[0,1]^3$:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{x_i}, \quad \beta = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \delta_{y_j} \quad (3)$$

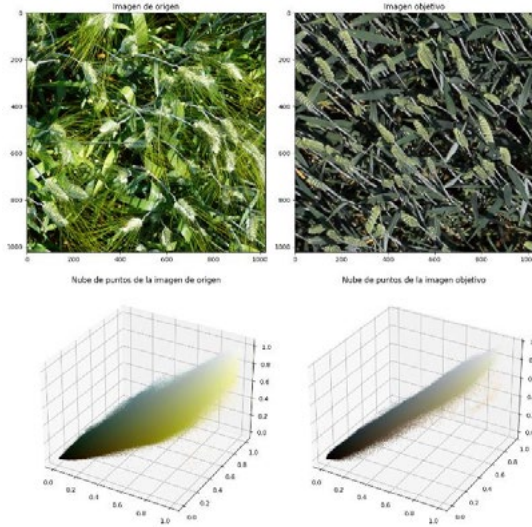


Figura 2. Representación de las imágenes como nubes de puntos en el espacio RGB.

donde $x \in (\mathbb{R}^3)^N$ y $y \in (\mathbb{R}^3)^M$ son tensores con valores reales y de dimensiones $(N,3)$ y $(M,3)$, que representan la información de los píxeles en cada uno de los tres canales de color. Por lo tanto, la adaptación de dominio se realizó con el objetivo de que la imagen de la izquierda en la (Fig. 2) termine con una paleta de colores más parecida a la de la imagen de la derecha, y para hacer esto posible se hace uso de la representación de ambas imágenes como nubes de puntos.

El OT se calcula a través de una aproximación con la divergencia de Sinkhorn $S_{\epsilon,\rho}$, ya que el algoritmo de Sinkhorn es utilizado para acelerar la convergencia del OT [10]. Como función de costo se utiliza la distancia de Wasserstein con $p = 2$, y al hacerlo, se encuentra que el gradiente de la divergencia de Sinkhorn

$$v_i = \frac{1}{\alpha_i} \nabla_{x_i} S_{\epsilon,\rho}(\alpha, \beta) \quad (4)$$

define un mapeo cuya suavidad y alcance máximos se pueden definir como dos parámetros $blur = \sqrt{\epsilon}$ y $reach = \sqrt{\rho}$, respectivamente. Los parámetros $(\epsilon, \rho) = (0, +\infty)$ definen un OT perfecto, pero entre más se acerquen los parámetros a estos valores, al algoritmo le llevará más tiempo converger.

2.3 Proceso para la detección de las espigas en las imágenes

Para poder medir el efecto de la adaptación de dominio con OT en la identificación de espigas, primero se entrenó la red neuronal de detección de objetos YOLOv5s, la cual es una red de tipo convolucional desarrollada en Pytorch y con una arquitectura dividida en tres secciones: tronco, cuello y cabeza [13]. Este entrenamiento se hizo mediante el paquete “Ultralytics” [14] y utilizando un modelo pre-entrenado en la base de datos COCO. Primero se entrenó el modelo con las imágenes de entrenamiento de la GWHD 2021 sin alterar, y se obtuvieron algunas métricas del desempeño de este modelo en los conjuntos de imágenes de validación y prueba. Posteriormente, se eligió un dominio objetivo de la base de datos y se realizó la adaptación de dominio de las imágenes de los demás dominios hacia este. Como el algoritmo de transferencia de color se realiza entre dos imágenes, para cada imagen de cada uno de los dominios de origen se eligió aleatoriamente una imagen del dominio objetivo. Una vez que se creó una copia de la base de datos con todas las imágenes adaptadas, se volvió a entrenar el modelo y se obtuvieron sus métricas de desempeño.

Tabla 1. Características del equipo de cómputo.

MSI Pulse GL66 12UGKV	
Sistema operativo	Ubuntu 22.04.3 (WSL2)
Procesador	Intel Core i7-12700H 2.70 GHz
RAM	32 GB DDR4
Tarjeta gráfica	NVIDIA GeForce RTX 3070

Este proceso se repitió algunas veces, haciendo la selección de dos dominios objetivo distintos y probando cuatro combinaciones de los parámetros de blur y reach para cada dominio.

Los códigos utilizados para esta investigación fueron desarrollados en Python. En la Tabla 1 se muestran las características del equipo de cómputo en que se ejecutaron todos los códigos. Para cada una de las cuatro elecciones de parámetros, se estableció la semilla aleatoria 0 para que la elección de las imágenes del dominio objetivo siempre fuera la misma. En cuanto al modelo YOLOv5s, también se estableció una semilla 0 para asegurar la reproducibilidad de los resultados eligiendo la misma configuración de parámetros en cada entrenamiento. Estos parámetros fueron un tamaño de imagen de 640x640, 100 épocas de entrenamiento y una paciencia de 10, dejando los demás parámetros con los valores por defecto que establece Ultralytics. La entrada de la red es un tensor de tamaño (3,640,640) que representa a la imagen de 3 canales y 640x640 píxeles por canal, mientras que su salida es un tensor de tamaño (N,6), donde N es el número de objetos detectados en la imagen, y el 6 representa las 4 coordenadas xywh que definen el cuadro delimitador de un objeto, más un nivel de confianza para el objeto y su índice de clase.

La validación del modelo se realizó mediante la división de los datos en tres conjuntos: uno de entrenamiento donde se aprenden los parámetros de la red, uno de validación para evaluar las predicciones del modelo y optimizar sus parámetros en base a estas predicciones, y finalmente uno de prueba que sólo se utiliza al final para evaluar el desempeño del modelo en imágenes no vistas [15]. Estos tres conjuntos se utilizaron de acuerdo a la división establecida por los autores de la base de datos y que se menciona al principio de esta sección.

3. Resultados y discusión

Como primer paso del análisis, se observaron los resultados en la adaptación de dominio con el fin de comprobar que el algoritmo funciona correctamente en las imágenes de espigas de trigo. A partir de esto, se realizaron pruebas con tres combinaciones de los parámetros de blur y reach eligiendo dos imágenes objetivo de dominios distintos. Se eligió una imagen al azar para realizar la adaptación de dominio y los resultados de ésta pueden observarse en la (Fig. 3), donde puede verse en la fila del medio que la imagen de origen posee colores muy parecidos a los de la imagen objetivo del dominio 1, y lo mismo sucede en el caso del dominio 2 en la fila de abajo. Entonces, se encuentra que el algoritmo realiza de manera correcta la transferencia de colores de una imagen a otra.

Siguiendo la metodología descrita al final de la sección anterior, se encontró primero el desempeño del modelo de detección de objetos con las imágenes sin alterar. Para evaluar este desempeño se reportan tres métricas estándar de la detección de objetos: Precision, Recall y mAP50. Los resultados de esta etapa pueden verse en la Tabla 2, donde se reportan tanto para el conjunto de imágenes de validación como para el de imágenes de prueba.

Posteriormente, se realizó el proceso de adaptación de dominio de todas las imágenes con las cuatro combinaciones de parámetros mencionadas y eligiendo los dominios identificados por los nombres Arvalis_3 y

ETHZ_1 dentro de la base de datos GWHD 2021. Los resultados de la detección de objetos para estos casos pueden observarse en las Tablas 3 y 4 respectivamente.

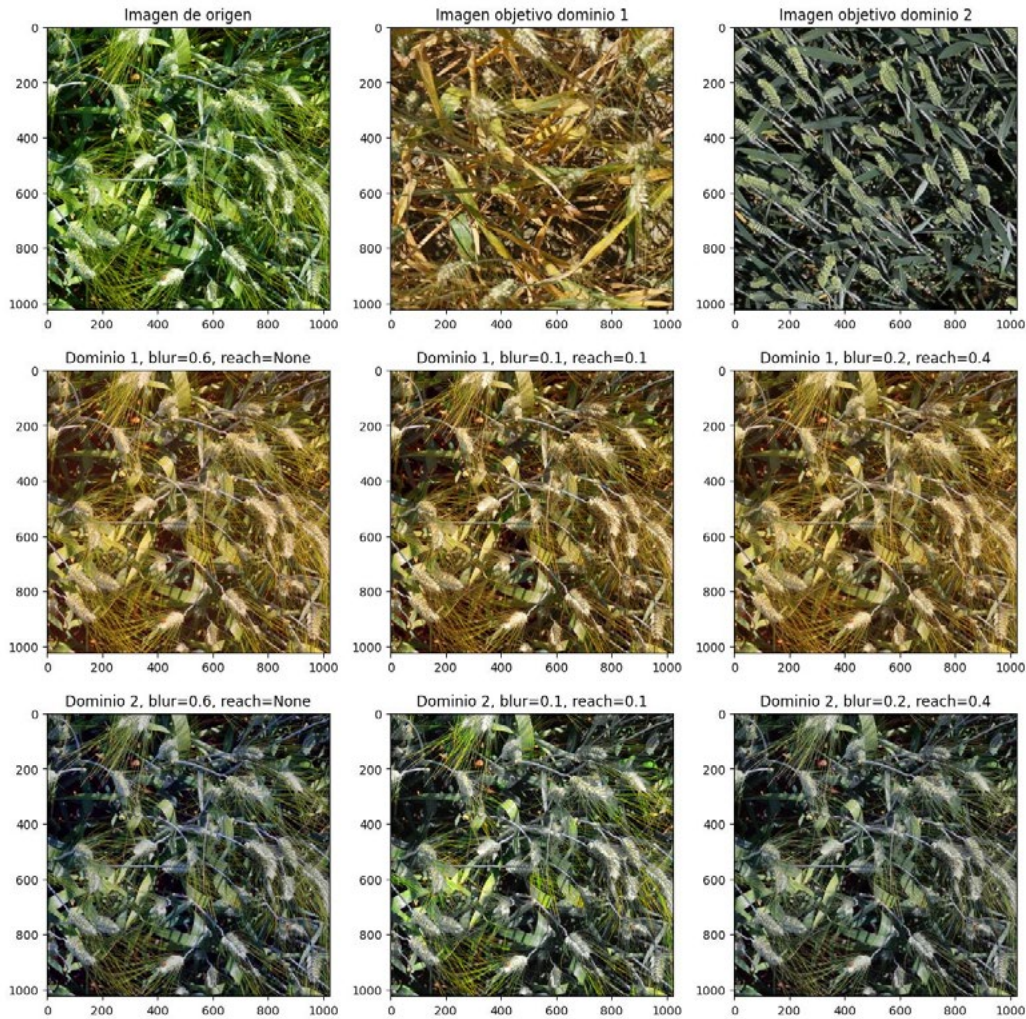


Figura 3. Resultado de la adaptación de dominio con dos dominios objetivo y distintos parámetros.

Comparando estas métricas se puede observar que en el dominio ETHZ_1, el cual corresponde a imágenes como la del dominio 2 en la (Fig. 3), se obtienen mejores resultados que los de la Tabla 3 en todos los casos, y también en tres de las cuatro combinaciones de parámetros se consigue mejorar los resultados de la Tabla 2. En cambio, los resultados en el dominio Arvalis_3, que corresponde a imágenes como el dominio 1 de la (Fig. 3),

sólo logran superar los resultados de la Tabla 2 en una ocasión.

Tabla 2. Resultados de la detección de espigas para las imágenes sin modificar.

Conjunto de imágenes	Precision	Recall	mAP50
Validación	0.908	0.827	0.905
Prueba	0.792	0.618	0.701

También, se puede ver que para ambos dominios los mejores resultados obtenidos se hicieron con los parámetros de $blur = 0.6$ y $reach = \infty$, donde este último es el valor por

defecto del parámetro. Esto quiere decir que la elección de parámetros resulta también importante para lograr una adaptación de dominio que mejore la detección de espigas.

Tabla 3. Resultados de la detección de espigas realizando la adaptación de las imágenes hacia el dominio Arvalis_3 con distintas combinaciones de parámetros.

Parámetros		Validación			Prueba		
blur	reach	Precision	Recall	mAP50	Precision	Recall	mAP50
0.1	0.1	0.903	0.799	0.889	0.758	0.564	0.645
0.6	-	0.914	0.841	0.914	0.806	0.630	0.709
0.6	0.3	0.906	0.815	0.894	0.744	0.594	0.671
0.2	0.4	0.906	0.799	0.886	0.758	0.554	0.637

Tabla 4. Resultados de la detección de espigas realizando la adaptación hacia el dominio ETHZ_1 con distintos parámetros.

Parámetros		Validación			Prueba		
blur	reach	Precision	Recall	mAP50	Precision	Recall	mAP50
0.1	0.1	0.912	0.850	0.917	0.802	0.633	0.712
0.6	-	0.912	0.857	0.923	0.824	0.663	0.742
0.6	0.3	0.920	0.862	0.924	0.829	0.648	0.732
0.2	0.4	0.909	0.833	0.907	0.794	0.613	0.690

4. Conclusiones

La adaptación de dominio, abordada como una transferencia de colores en imágenes de espigas de trigo y realizada mediante el OT con la divergencia de Sinkhorn, tiene el potencial de mejorar la detección de espigas de un modelo YOLO. Sin embargo, no siempre se logrará mejorar la detección, ya que se puede observar que la elección de parámetros para el algoritmo utilizado, y principalmente la elección de un dominio objetivo, pueden

influir de manera significativa en si se mejora o no la detección y en qué porcentaje. A partir de las pruebas realizadas en esta investigación, se pudo obtener una mejora de hasta 1.8% en el mAP50 para las imágenes de validación, y de hasta 4.1% para las imágenes de prueba de la base de datos GWHD 2021.

Los resultados muestran avances prometedores en la aplicación de adaptación de dominio con transporte óptimo para mejorar el desempeño en la detección de objetos. Cabe destacar que durante la

investigación se hizo la suposición de que los dominios de la base de datos poseían una similitud interna en cuanto a la distribución de colores de las imágenes que los componen. En futuros trabajos, se planea realizar una definición más objetiva de los dominios a través de alguna técnica de agrupamiento, donde además se mida esta similitud interna de las imágenes de un dominio, con el fin de elegir de manera más objetiva el dominio objetivo y comprobar si esto podría aumentar aún más las métricas de detección de objetos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por los recursos otorgados para la realización de esta investigación.

Referencias

- [1] P. Langridge *et al.*, “Meeting the Challenges Facing Wheat Production: The Strategic Research Agenda of the Global Wheat Initiative,” Nov. 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/agronomy12112767.
- [2] J. A. Fernandez-Gallego, S. C. Kefauver, N. A. Gutiérrez, M. T. Nieto-Taladriz, and J. L. Araus, “Wheat ear counting in-field conditions: High throughput and low-cost approach using RGB images,” *Plant Methods*, vol. 14, no. 1, Mar. 2018, doi: 10.1186/s13007-018-0289-4.
- [3] Y. Zhang, M. Li, X. Ma, X. Wu, and Y. Wang, “High-Precision Wheat Head Detection Model Based on One-Stage Network and GAN Model,” *Front Plant Sci*, vol. 13, Jun. 2022, doi: 10.3389/FPLS.2022.787852.
- [4] S. Rasti, C. J. Bleakley, N. M. Holden, R. Whetton, D. Langton, and G. O’Hare, “A survey of high resolution image processing techniques for cereal crop growth monitoring,” Jun. 01, 2022, *China Agricultural University*. doi: 10.1016/j.inpa.2021.02.005.
- [5] T. van Klompenburg, A. Kassahun, and C. Catal, “Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review,” *Comput Electron Agric*, vol. 177, p. 105709,

Oct. 2020, doi:
10.1016/J.COMPAG.2020.105709.

- [6] A. Sanaeifar, M. L. Guindo, A. Bakhshipour, H. Fazayeli, X. Li, and C. Yang, “Advancing precision agriculture: The potential of deep learning for cereal plant head detection,” *Comput Electron Agric*, vol. 209, p. 107875, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.COMPAG.2023.107875.
- [7] E. David *et al.*, “Global Wheat Head Dataset 2021: more diversity to improve the benchmarking of wheat head localization methods,” May 2021, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2105.07660v2>
- [8] E. David *et al.*, “Global Wheat Head Detection Challenges: Winning Models and Application for Head Counting,” *Plant Phenomics*, vol. 5, Jun. 2023, doi: 10.34133/PLANTPHENOMICS.0059/SUPPL_FILE/PLANTPHENOMICS.0059.F1.DOCX.
- [9] Z. K. J. Hartley and A. P. French, “Domain adaptation of synthetic images for wheat head detection,” *Plants*, vol. 10, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/plants10122633.
- [10] J. Feydy, T. Séjourné, F. X. Vialard, S. I. Amari, A. Trounev, and G. Peyré, “Interpolating between Optimal Transport and MMD using Sinkhorn Divergences,” in *The 22nd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, PLMR, 2019, pp. 2681–2690. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1810.08278v1>
- [11] S. Kolouri, S. R. Park, M. Thorpe, D. Slepcev, and G. K. Rohde, “Optimal Mass Transport: Signal processing and machine-learning applications,” *IEEE Signal Process Mag*, vol. 34, no. 4, pp. 43–59, Jul. 2017, doi: 10.1109/MSP.2017.2695801.
- [12] N. Courty, R. Flamary, D. Tuia, and A. Rakotomamonjy, “Optimal Transport for Domain Adaptation,” *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, vol. 39, no. 9, pp. 1853–1865, Jul. 2015, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2615921.
- [13] J. Terven and D. Cordova-Esparza, “A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS,” Apr. 2023, doi: 10.3390/make5040083.



- [14] G. Jocher, J. Qiu, and A. Chaurasia, “Ultralytics YOLO,” Jan. 2023, 8.0.0. [Online]. Available: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>
- [15] Y. Xu and R. Goodacre, “On Splitting Training and Validation Set: A Comparative Study of



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Cross-Validation, Bootstrap and Systematic Sampling for Estimating the Generalization Performance of Supervised Learning,” *J Anal Test*, vol. 2, no. 3, pp. 249–262, Jul. 2018, doi: 10.1007/S41664-018-0068-2/FIGURES/9.

Estudios del pluriverso en el campo del diseño, importancia del tema desde 2015.

Studies of pluriverse in the field of design, importance of the subject since 2015.

Flores Montero Jorge Andrés

Afiliación: Posgrado de Ingeniería, Doctorado en Innovación, Tecnología y Hábitat

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

jorge.andres.flores@uaq.edu.mx

Palabras clave: DIS, Pluriverso, Pluriversalidad, Diseño, Diversidad, Revisión.

Resumen- En años recientes, el concepto de pluriverso ha ganado relevancia en los estudios del diseño, cuestionando críticamente la concepción universal de un mundo que niega la diversidad de múltiples cosmovisiones y mundos. Este trabajo revisa las aproximaciones teóricas, metodológicas y aplicadas del pluriverso en el diseño de la última década. Mediante el análisis de publicaciones extraídas de bases de datos como Scopus y Google Scholar, se identifican las tendencias emergentes y se categorizan los tipos de estudios publicados. Los resultados revelan el predominio de estudios aplicados, seguidos por los estudios teóricos y metodológicos. Esta revisión ofrece una visión del crecimiento y desarrollo del concepto en el área del diseño, evidenciando su importancia tanto en la teoría como en la práctica, abriendo nuevas perspectivas para construir futuros más inclusivos y sostenibles.

Keywords: DIS, Pluriverse, Pluriversality, Design, Diversity, Review.

Abstract- In recent years, the concept of the pluriverse has gained relevance in design studies, critically questioning the universal conception of one world that denies the diversity of multiple worldviews and worlds. This paper reviews the theoretical, methodological, and praxis approaches to the pluriverse in the field of design over the past decade. Through the analysis of publications sourced from databases such as Scopus and Google Scholar, emerging trends are identified, and the types of studies published are categorized. The results reveal the predominance of applied studies, followed by theoretical and methodological studies. This review provides an overview of the growth and development of the concept within the field of design, highlighting its importance in both theory and practice, and opening new perspectives for building more inclusive and sustainable futures.

1. Introducción

En años recientes el concepto de pluriverso ha generado una gran atención en el campo de los estudios del diseño debido a las constantes dificultades que enfrentan académicos y profesionales debido a la naturaleza compleja del diseñar y a los actuales desafíos de un mundo globalizado e interconectado donde el capitalismo impone fuertemente la forma en

que se estructuran los mundos y la vida de sus habitantes [1].

El término pluriverso, se puede entender como una filosofía crítica que cuestiona la noción de una sola realidad de carácter universal, y en su lugar, propone la existencia de múltiples y diversas cosmovisiones, de formas de ser y habitar [2]. En otras palabras los “pluriversos” pueden ser entendidos como múltiples representaciones de la visión-mundo que

desafían la idea de una única forma de entender la realidad [3].

En el ámbito del diseño, el pluriverso se presenta como un concepto en exploración y desarrollo donde éste se concibe no solo como la coexistencia de múltiples realidades, sino como un marco o estructura que facilita la creación de entornos más equitativos y sostenibles. En este sentido, el diseño se posiciona como una herramienta clave para imaginar y materializar futuros en los que la diversidad cultural y la colaboración intercultural sean no solo respetadas, sino también celebradas como elementos esenciales en la práctica y enseñanza de la disciplina [4].

Recientes investigaciones destacan una polivalencia intrínseca al término, con estudios que abarcan desde aproximaciones teóricas y metodológicas hasta las prácticas de diseño. Por ello, esta revisión bibliográfica se realiza con la intención de explorar dichos estudios y la relevancia y permeabilidad que ha tenido el concepto de los pluriversos en el campo del diseño en los últimos diez años. Esto a través de una categorización donde se observan los diferentes tipos de estudio relacionados al pluriverso en el diseño, así como prácticas de diseño pluriversalistas.

2. Metodología

La metodología utilizada en este trabajo consiste en una serie de pasos que se pueden apreciar en la Fig. 1. Esta metodología se basa en la guía para la recuperación de información en revisiones sistemáticas de Campbell [5].



Figura 1. Diagrama de metodología utilizada.

A continuación, se describen las dos fases principales de la metodología:

a) Fase 1.

En la Fase 1 se desarrollan dos etapas. La primera de estas consiste en delimitar una estrategia de búsqueda para explorar los estudios existentes sobre el término en el área del diseño. Esta búsqueda se llevó a cabo haciendo uso de la base de datos de Scopus y la herramienta de Google Scholar para diversificar los resultados obtenidos. La búsqueda se realizó en Scopus utilizando el término de "pluriverse AND design" en los títulos, resúmenes y palabras clave de los autores. En Google Scholar la indagación se delimitó al término "pluriverse + design" únicamente en los títulos debido a que su motor búsqueda no es tan específico como el de Scopus debiendo cerrar ésta para obtener resultados más adecuados. Además, en ambas exploraciones se delimitó la búsqueda a resultados no mayores a 10 años de antigüedad, es decir a partir del año 2014. De esta primera etapa se encontraron 39 resultados en Scopus y 27 en Google Scholar. Entre estos hubo 4 elementos repetidos y 5 documentos que se descartaron rápidamente por su falta de rigurosidad o pertinencia.

La segunda etapa de esta fase consiste en la descarga y procesamiento de los documentos bibliográficos y sus metadatos. La intención es filtrar la información relevante al objetivo de esta revisión mediante la lectura de títulos y resúmenes cribando los resultados obtenidos haciendo uso de los siguientes criterios:

1. El título o resumen no corresponda con estudios o prácticas relacionados al campo del diseño.
2. Que los documentos no se puedan obtener con las credenciales proporcionadas por la institución educativa del investigador.

3. Que los documentos no sean artículos de investigación, actas de conferencias o capítulos de libro.
4. Que el documento sea anterior al año 2014.

b) Fase 2.

La Fase 2 consta de dos etapas. En la primera, se analizaron los metadatos recabados para obtener datos bibliométricos relevantes. Además, mediante la lectura crítica de los documentos se presentan los resultados, métodos y limitaciones de los trabajos revisados. Finalmente, con la información obtenida se categorizaron los trabajos analizados de acuerdo al tipo de estudio, pudiendo ser:

1. Estudio Teórico: donde se agrupan reflexiones críticas, revisiones de literatura o propuestas conceptuales y de paradigmas.
2. Estudio Metodológico: donde se consideran a las propuestas de nuevas metodologías o herramientas para el diseño.
3. Estudio Aplicado: aquí se consideran a las investigaciones experimentales, trabajos cualitativos en campo o prácticas de diseño en campo o aula.

Esta información se presenta en tablas que sintetizan el proceso mencionado.

3. Resultados y discusión

De acuerdo a lo anterior, se realizó un primer cribado mediante la lectura resúmenes obteniendo 56 publicaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Número de artículos revisados.

Index	Número de Publicaciones
Scopus	36
Google Scholar	20

Con lo anterior, se encontró que las publicaciones referentes a la relación entre pluriverso y diseño han crecido bastante en los últimos 10 años (Fig. 2).

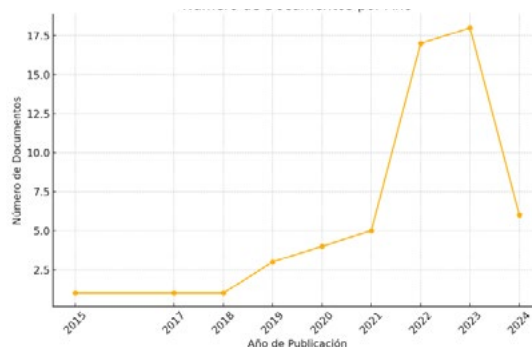


Figura 2. Número de Publicaciones por año. Fecha: 28/09/2024.

El tipo de publicaciones predominantes son los artículos (44.6%), seguido de los capítulos de libro (30.4%), las actas de conferencias (21.4%) y finalmente los libros (3.6%) como se puede observar en la Fig. 3.

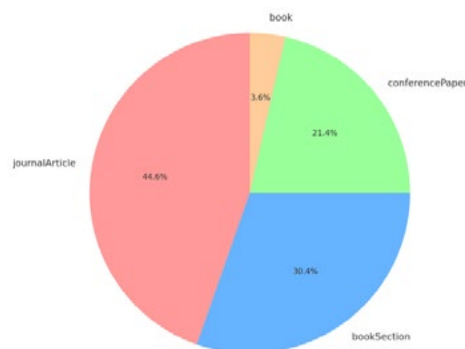


Figura 3. Tipo de Publicaciones, Fecha: 28/09/2024.

En cuanto a la frecuencia de las palabras clave, las más frecuentes son *pluriverse* con 12 apariciones; le sigue con *global south* y *pluriversality*, ambas con 3 apariciones y finalmente términos como *decoloniality* y *design*, entre otros con 2 o menos apariciones. Esto se puede apreciar en la Fig. 4.

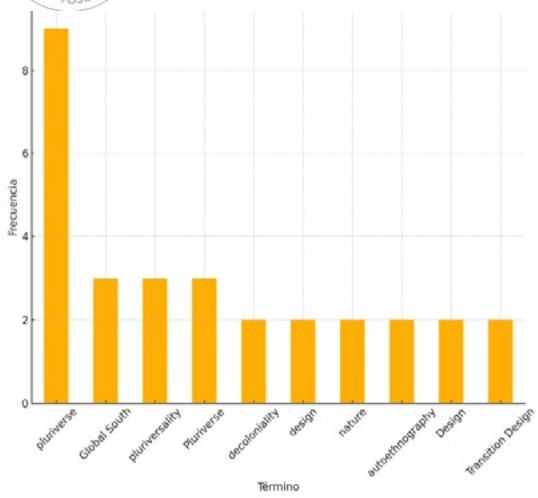


Figura 4. Frecuencia de palabras clave más frecuentes. 28/09/2024.

Tomando en cuenta los criterios de cribados mencionados en la metodología se descartaron el siguiente número de publicaciones por las siguientes razones observables en la Tabla 2:

Tabla 2. Publicaciones descartadas.

Razón	Núm. de documentos
El trabajo no corresponda directamente con estudios o prácticas relacionados a los estudios del diseño.	8
Documentos no obtenible con las credenciales disponibles por el investigador.	11
Publicaciones diferentes a artículos de investigación, actas de conferencias o capítulos de libro.	2
TOTAL	21

Acorde a la metodología, durante la fase 2 se realizó un análisis sistemático de las 35 publicaciones que pasaron ambos filtrados. A continuación, se muestra una parte de la síntesis de esta información mediante diez ejemplos que sirven para mostrar el procesamiento de la información (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados del análisis de la revisión sistemática de lecturas.

	Título	Resultado	Metodología	Categoría de Estudio
1	Transiciones: a space for research and design for transitions to the pluriverse.	El proyecto no presenta resultados empíricos, sin embargo genera marcos teóricos y prácticas de transición pluriversal en Colombia [6].	Se propone crear estudios regionales en Colombia aplicando principios de diseño ontológico y activismo de transición para imaginar futuros más sostenibles.	Estudio Metodológico.
2	Toward a decolonial global ethics.	Propone una ética global decolonial que cuestiona las jerarquías coloniales, priorizando el diálogo entre las cosmovisiones diversas rechazando los modelos universales occidentales [7].	Analiza cómo las éticas decoloniales se enfocan en el diálogo intercultural y la pluriversalidad, proponiendo un mundo donde muchas cosmovisiones puedan coexistir.	Estudio Teórico.
3	What Is at Stake with Decolonizing Design? A Roundtable.	El consenso es que decolonizar el diseño no es una mera inclusión, sino un proyecto político radical para redirigir el diseño hacia un pluralismo ontológico [8].	Discusión en mesa redonda sobre la política del diseño y la necesidad de un rediseño ontológico, cuestionando los supuestos universales del diseño occidental.	Estudio Aplicado.
4	Commentary on 'Habitability and Design: Radical interdependence and the remaking of	Se apoya la visión de Escobar sobre un diseño que promueva la interdependencia radical y resalte el vínculo humano con la naturaleza y señala los desafíos prácticos [9].	Se hace una revisión de la trayectoria intelectual de Escobar y conecta su enfoque pluriversal con teorías ecológicas y de justicia social en un marco de diseño.	Estudio Teórico.

	cities', by Arturo Escobar.			
5	Preparing for the Pluriverse: Encouraging a critical self-reflective practice to build cultural humility into service design.	Se identificaron obstáculos, como la falta de integración práctica de la humildad cultural y la dificultad para discutir abiertamente las diferencias culturales [10].	Investigación cualitativa basada en entrevistas con 18 diseñadores, usando herramientas tangibles y artefactos para promover la humildad cultural en el diseño.	Estudio Aplicado.
6	Participating in the Pluriverse from within the Academy: Design Thinking Assessment and Research.	Se muestra que el pensamiento de diseño en la academia no implementa suficientemente el prototipado y la iteración, pero promueve la escucha radical y la colaboración [11].	Estudios de caso longitudinales y mapeos sistemáticos de programas de pensamiento de diseño en la Universidad de Elon, evaluando su impacto en diversos sectores.	Estudio Aplicado.
7	Autonomous design and the emergent transnational critical design studies field.	El diseño autónomo desafía el capitalismo y colonialismo, promoviendo prácticas locales que permiten a comunidades crear sus propios futuros acordes con sus necesidades y la justicia social [12].	Se analiza cómo comunidades resistentes desarrollan enfoques de diseño autónomo, combinando estudios postcoloniales, teoría crítica del diseño y movimientos sociales mediante un análisis teórico y transnacional.	Estudio Teórico.
8	Engineering, patriarchy, and the pluriverse: what world of many worlds do we design? What worlds do we teach?	La enseñanza de la ingeniería sigue privilegiando valores occidentales y patriarcales. Se necesitan enfoques pluriversales que valoren las cosmovisiones y saberes diversos [13].	Reflexión crítica y autoevaluación de prácticas educativas en ingeniería, utilizando teoría crítica y ejemplos de diseño sostenible y pluriversal.	Estudio Teórico
9	On the Usefulness of Modern Animism: Co-Creating Architecture with Soils as Ontopolitical Practice.	El suelo se concibe como un ser co-creativo que responde a las acciones humanas. La arquitectura que integra este "animismo moderno" fomenta ecosistemas diversos y resilientes los cuales responden a los cambios ambientales mostrando una forma de agencia no humana [14].	Se establece una correspondencia ficticia con el suelo mediante reflexiones ecológicas y análisis filosófico sobre las diversas prácticas arquitectónicas y su impacto en los ecosistemas.	Estudio Metodológico.

Como resultado de la revisión referente al término *pluriverse and design* y de la categorización de los resultados se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 4.)

Tabla 4. Resultados de la categorización de las publicaciones revisadas.

Categoría	Referencia
Estudio Teórico	[3], [7], [9], [12], [13], [20], [25], [32], [36], [40]
Estudio Metodológico	[6], [14], [15], [16], [17], [21], [31], [35]
Estudio Aplicado	[8], [10], [11], [18], [19], [22], [23], [24], [25], [27], [28], [29], [30], [33], [34], [37], [38], [39]

Se encontró que, de las 35 publicaciones revisadas, 10 fueron Estudios Teóricos; 7 se trataron de Estudios Metodológicos y finalmente, hubo 18 Estudios Aplicados. Con lo anterior se observa que en el área del diseño predominan los estudios sobre la práctica aplicada y, por el contrario, el desarrollo de metodologías y herramientas de diseño suele trabajarse en menor medida (Fig. 5).

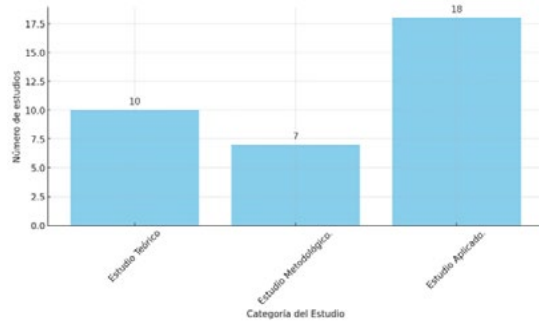


Figura 5. Número de publicaciones por tipo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, los estudios aplicados predominan con un 51.4 % del total de publicaciones, seguido por aquellos estudios teóricos con un 28.6 % y finalmente, les siguen los estudios metodológicos con un 20.0 % (Fig. 6).

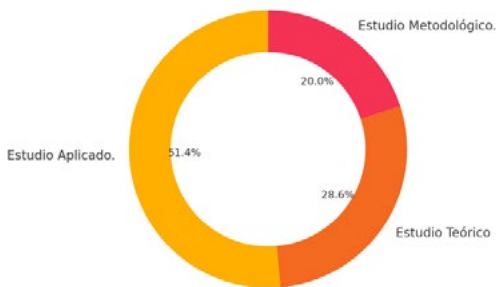


Figura 6. Porcentaje de publicaciones por tipo de estudio. Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

En este trabajo se demuestra la polivalencia intrínseca y la creciente importancia del concepto de pluriverso en el campo del diseño. Mediante una revisión bibliográfica sistemática de investigaciones de la última década se analizaron 35 publicaciones que se categorizaron como estudios teóricos, metodológicos y aplicados. Se encontró que el 51,4% de las publicaciones corresponden a estudios aplicados, lo que indica un gran interés en llevar los principios pluriversales a la práctica, ya sea mediante la praxis o la experimentación. Los estudios teóricos, que representan el 28,6% de las publicaciones, sin duda alguna han sido de suma importancia

para desarrollar los marcos conceptuales que a dichos estudios aplicados. Por su parte, los estudios metodológicos (20%) se centran en propuestas que buscan innovar la manera en que se hace diseño para integrar estos principios en el proceso de diseño y romper así con las formas coloniales de diseñar.

Cabe remarcar que en general, las investigaciones revisadas subrayan la necesidad de replantear las prácticas de diseño tradicionales hacia la inclusión de perspectivas decoloniales o pluriversales. Desde una perspectiva cuantitativa, esto se observa en el aumento significativo en la producción académica sobre este tema, especialmente en los últimos cinco años, lo que refleja un interés emergente en la comunidad académica de los estudios del diseño.

Finalmente, de cara al futuro el concepto de pluriverso promete convertirse en un punto central de las discusiones sobre diseño, no solo en esferas académicas sino también en la práctica profesional. Además, la incorporación de este marco teórico en la praxis del diseño y su enseñanza puede tener un impacto positivo en la creación de entornos más inclusivos, justos y sostenibles, de manera que la disciplina del diseño contribuya a imaginar y construir múltiples mundos y cosmovisiones que puedan coexistir en una convivencia interculturalmente respetuosa.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Querétaro por todos los recursos brindados para poder llevar a cabo este trabajo.

Se agradece profundamente a la Dra. Reina Loredó por sus siempre bien recibidos consejos, voluntad de compartir y su apoyo cercano. De igual manera se reconoce la ayuda al Dr. Juvenal Rodríguez por el apoyo otorgado en la búsqueda y obtención de fuentes y sus útiles asesorías.

Referencias

- [1] A. Kothari, A. Salleh, A. Escobar, F. Demaria, y A. Acosta, «Introduction: Finding Pluriversal Paths», en *Pluriverse: a post-development dictionary*, A. Kothari, A. Salleh, A. Escobar, F. Demaria, y A. Acosta, Eds., New Delhi, India: Tulika Books, 2019.
- [2] A. J. Marsella, «Diversity in a Global Era: The context and consequences of differences», *Counselling Psychology Quarterly*, vol. 22, n.º 1, pp. 119-135, mar. 2009, doi: 10.1080/09515070902781535.
- [3] A. Escobar, *Designs for the pluriverse: radical interdependence, autonomy, and the making of worlds*. en New ecologies for the twenty-first century. Durham: Duke University Press, 2018.
- [4] A. Escobar, *Autonomía y diseño: la realización de lo comunal*. Buenos Aires, Argentina: Tinta Limón Ediciones, 2017.
- [5] S. Kugley *et al.*, «Searching for studies: a guide to information retrieval for Campbell systematic reviews», *Campbell Systematic Reviews*, vol. 13, n.º 1, pp. 1-73, ene. 2017, doi: 10.4073/cmg.2016.1.
- [6] A. Escobar, «Transiciones: a space for research and design for transitions to the pluriverse», *Design Philosophy Papers*, vol. 13, n.º 1, pp. 13-23, ene. 2015, doi: 10.1080/14487136.2015.1085690.
- [7] R. Dunford, «Toward a decolonial global ethics», *Journal of Global Ethics*, vol. 13, n.º 3, pp. 380-397, 2017, doi: 10.1080/17449626.2017.1373140.
- [8] T. Schultz *et al.*, «What Is at Stake with Decolonizing Design? A Roundtable», *Design and Culture*, vol. 10, n.º 1, pp. 81-101, 2018, doi: 10.1080/17547075.2018.1434368.
- [9] D. Simon, «Commentary on ‘Habitability and Design: Radical interdependence and the remaking of cities’, by Arturo Escobar», *Geoforum*, vol. 101, pp. 218-221, 2019, doi: 10.1016/j.geoforum.2019.01.004.
- [10] S. Prakash y H. Oda, «Preparing for the Pluriverse: Encouraging a critical self-reflective practice to build cultural humility into service design», en *Proceedings of Relating Systems Thinking and Design (RSD9) 2020 Symposium*, Ahmedabad, India, oct. 2020. [En línea]. Disponible en: <http://openresearch.ocadu.ca/id/eprint/3677>
- [11] D. Lake, «Participating in the Pluriverse from within the Academy: Design Thinking Assessment and Research», en *Pivot 2020: Designing a World of Many Centers*, R. Marques Leitão, L.-A. Noel, y L. Murphy, Eds., Design Research Society, 2020. doi: 10.21606/pluriversal.2020.206.
- [12] A. Escobar, «Autonomous design and the emergent transnational critical design studies field», en *Design Struggles: Intersecting Histories, Pedagogies, and Perspectives*, C. Mareis y N. Paim, Eds., Amsterdam: Valiz, 2021. doi: 10.47982/BookRxiv.34.
- [13] S. Mutch, M. Borland, y K. Mercer, «Engineering, patriarchy, and the pluriverse: what world of many worlds do we design? What worlds do we teach?», *PCEEA*, jun. 2021, doi: 10.24908/pceea.vi0.14915.
- [14] E. Guibert, «On the Usefulness of Modern Animism: Co-Creating Architecture with Soils as Ontopolitical Practice», *Geohumanities*, vol. 7, n.º 1, pp. 176-197, 2021, doi: 10.1080/2373566X.2021.1904785.
- [15] Z. Anastassakis, «Redesigning design in the pluriverse: speculative fabulations from a Brazilian design school in the borderlands», en *Design struggles: intersecting histories, pedagogies, and perspectives*, C. Mareis y N. Paim, Eds., en PLURAL, no. 3., Amsterdam: Valiz, 2021.
- [16] M. Guatam, «Systemic-self and Pluriverse: A design research framework for pluriverse», en *Proceedings of Relating Systems Thinking and Design*, Brighton, United Kingdom, oct. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://openresearch.ocadu.ca/id/eprint/4251/>
- [17] A. Escobar, «Designs for the Pluriverse: Radical Interdependence, Autonomy, and the Making of Worlds (2018)», en *Anthropological theory for the twenty-first century: a critical approach*, A. L. Bolles, R. Gomberg-Muñoz, B. C. Perley, y K. V. Brondo, Eds., Toronto; Buffalo; London: University of Toronto Press, 2022, pp. 316-320. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85136400734&partnerID=40&md5=b78c092699cde3c24bc78e4f96f5ffe1>
- [18] M. S. Hormazábal y M. Tolosa, «Record of a multispecies creative exploration in the austral forests», en *Artistic Cartography and Design Explorations Towards the Pluriverse*, 2022, pp. 17-27. doi: 10.4324/9781003285175-3.
- [19] M. A. Lujan Escalante y C. Mortimer, «Value-mapping transitions into the Pluriverse: Design notes on Participatory Methods, Traditional Ecological Knowledge and Emergency Community Resilience within the Ring of Fire», en *Participatory Design Conference 2022: Volume 1*, Newcastle, United Kingdom: ACM, ago. 2022, pp. 50-62. doi: 10.1145/3536169.3537779.
- [20] M. Fonseca de Almeida, B. Gonçalves Guazzelli, y P. Marques Braga, «De-atomization of the drawing: Memory, a path to the real world», *Astragalo*, vol. 1, n.º 30, pp. 117-138, 2022, doi: 10.12795/astragalo.2022.i30.07.

- [21] L.-A. Noel, «Designing New Futures for Design Education», *Design and Culture*, vol. 14, n.º 3, pp. 277-291, 2022, doi: 10.1080/17547075.2022.2105524.
- [22] J. Häkikall, S. Paananen, M. Suoheimo, y M. Mäkilä, «Pluriverse perspectives in designing for a cultural heritage context in the digital age», en *Artistic Cartography and Design Explorations Towards the Pluriverse*, 2022, pp. 134-143. doi: 10.4324/9781003285175-14.
- [23] S. Miettinen, E. Mikkonen, M. C. Loschiavo Dos Santos, y M. Sarantou, «Introduction: Artistic cartographies and design explorations towards the pluriverse», en *Artistic Cartography and Design Explorations Towards the Pluriverse*, 2022, pp. 1-14. doi: 10.4324/9781003285175-1.
- [24] E. Maldonado-Villalpando, J. Paneque-Gálvez, F. Demaria, y B. M. Napoletano, «Grassroots innovation for the pluriverse: evidence from Zapatismo and autonomous Zapatista education», *Sustainability Science*, vol. 17, n.º 4, pp. 1301-1316, 2022, doi: 10.1007/s11625-022-01172-5.
- [25] S. Prakash, «Preparing for the pluriverse: Embracing critical self-reflection in service design practice», presentado en DRS2022: Bilbao, jun. 2022. doi: 10.21606/drs.2022.566.
- [26] P. West, «Excluding by design», en *Artistic Cartography and Design Explorations Towards the Pluriverse*, 2022, pp. 99-109. doi: 10.4324/9781003285175-11.
- [27] M. Griniuk, D. Akimenko, S. Miettinen, H. Pietarinen, y M. Sarantou, «Multiperspective take on pluriversal agenda in artistic research», en *Artistic Cartography and Design Explorations Towards the Pluriverse*, 2022, pp. 40-54. doi: 10.4324/9781003285175-5.
- [28] D. Hug, «Sound Design for the Pluriverse - A Design Exploration of Sonic Hermeneutic Affordances of Interactive Things», en *Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum 2023*, Turin, Italy: European Acoustics Association, ene. 2022, pp. 5913-5920. doi: 10.61782/fa.2023.0590.
- [29] N. Kuriakose, «Contemporary Design Attitudes for Pluriverse: Review & Introduction to Industry Practice», en *Blucher Design Proceedings*, Spain, Brazil, India, Finland, Italy, Netherlands, USA, Scotland: Editora Blucher, oct. 2023, pp. 346-359. doi: 10.5151/ead2023-2SAO-01Full-07Nithin-Kuriakose.
- [30] E. M. Formia, E. Lupo, y L. Mehmeti, «Designing Pluriverse Knowledge in Design Research: The Case of the 8th International Forum of Design as a Process», en *Blucher Design Proceedings*, Spain, Brazil, India, Finland, Italy, Netherlands, USA, Scotland: Editora Blucher, oct. 2023, pp. 280-293. doi: 10.5151/ead2023-2SAO-01Full-02Elena-Maria-Formia-et-al.
- [31] K. Vissonova y M. Hohl, «From Consumer Capitalism to Wellbeing: Re-imagining Futures of Design Education in the View of Pluriverse», en *The 7th International Conference for Design Education Researchers*, D. Jones, N. Borekci, V. Clemente, C. James, N. Lotz, L. Merete Nielsen, y L.-A. Noel, Eds., London: Design Research Society, dic. 2023. doi: 10.21606/drsld.2024.018.
- [32] M. Różalska, «Creating a more liveable world – how to connect pluriverse and design thinking in development studies and activities in the age of the Entropocene», en *IN/DI/VISIBLE. Social Responsibility in the Age of Entropocene*, M. Błaszowska-Nawrocka, M. Różalska, y A. Treska-Siwoń, Eds., AT Wydawnictwo, 2023. doi: 10.59862/7DhRbF9P.
- [33] D. A. González, «Within Mayan Textiles: Lekil kuxlejal and leading by obeying as proposals to decolonize handcrafted textile design research», *Kepes*, vol. 20, n.º 27, pp. 261-280, 2023, doi: 10.17151/kepes.2023.20.27.10.
- [34] N. B. Torretta, L. Reitsma, P.-A. Hillgren, T. N. Van Ryneveld, A.-M. Hansen, y Y. C. Muñoz, «Pluriversal spaces for decolonizing design: Exploring decolonial directions for participatory design», *Disena*, vol. 22, 2023, doi: 10.7764/disen.22.Article.8.
- [35] A. Prendiville, D. Evans, y C. Greru, «Challenging Assumptions in Social Design Research Undertaken in the Global South-India», en *The Routledge Companion to Design Research*, 2023, pp. 151-165. doi: 10.4324/9781003182443-15.
- [36] N. B. Torretta, «Take it Personally: What May it Take to Become Designers for Pluriversality?», *Kepes*, vol. 20, n.º 27, pp. 19-46, 2023, doi: 10.17151/kepes.2023.20.27.2.
- [37] L. Tan, G. Ferguson, B. Hung, H. Renata, R. Wood, y P. Woodruffe, «From Urban Development to the Pluriverse: Ontological Design for Natural and Cultural Heritage», en *IASDR 2023: Life-Changing Design*, Milan, Italy: Design Research Society, oct. 2023. doi: 10.21606/iasdr.2023.599.
- [38] J. J. Montes Cruz, D. Piracoca-Chaves, G. A. Pérez Rodríguez, y J. Pardo Gibson, «Design of the uncommon: Epistemological limits of co-design between industrial designers and artisans», *Kepes*, vol. 20, n.º 27, pp. 231-259, 2023, doi: 10.17151/kepes.2023.20.27.9.
- [39] L. Mehmeti y F. Elena María, «Paradigm shifts in research assessment for scientific publishing: emerging models in a pluriverse perspectives», en *DRS2024: Boston*, jun. 2024. doi: 10.21606/drs.2024.849.
- [40] R. Hann, «Pluriversal scenographics and staging world feelings: climate crisis in SUPERFLEX's 'It Is Not The End Of The World'», *Cultural Geographies*, vol. 31, n.º 3, pp. 315-336, 2024, doi: 10.1177/14744740241234288.

Evaluación numérica de un sistema de microfiltración de fluidos por fuerzas inerciales.

Numerical evaluation of a microfiltration fluid using inertial forces.

Cerda Saavedra, José Fernando¹, Christopher René Torres San Miguel¹
Sección de Estudios de Posgrado de Investigación ESIME Unidad Zacatenco
Instituto Politécnico Nacional
CDMX México

Correo electrónico jcerdas1400@alumno.ipn.mx, ctorress@ipn.mx

Palabras clave: Microfluidica, microfiltración, Lab on a Chip, evaluación numérica, fuerzas inerciales, filtración pasiva, diseño

Resumen- En el presente artículo se evaluó numéricamente un sistema de filtración por fuerzas inerciales en un lab on a chip. Se tuvo como finalidad depurar partículas con 50µm de diámetro en una solución, considerando el medio como no poroso, empleando la metodología sixsigma, con el desarrollo de sus etapas (DMAIC). Se establecieron condiciones de frontera, para un análisis matemático de comportamiento del fluido, se expuso y evaluó un diseño de geometría 2D, con una malla de 122 mil elementos en el interior del dominio y 21.5 mil elementos a lo largo de su periferia, comparando los resultados obtenidos analíticamente con un programa de cómputo. Por sus características y comparación con otras geometrías de enfoque inercial, se eligió la geometría recta serpentin. Evaluando el comportamiento del flujo laminar y caudal de la mezcla, con las condiciones de frontera establecidas, se validó el diseño del microfiltro propuesto implementando la geometría seleccionada.

Keywords: Microfluidics, microfiltration, Lab on a Chip, numerical evaluation, inertial forces, passive filtration, design.

Abstract- In this article, an inertial forces filtration system was numerically evaluated in a lab-on-a-chip. The aim was to purify particles with a diameter of 50µm in a solution, considering the medium as non-porous, using the sixsigma methodology, with the development of its stages (DMAIC). Boundary conditions were established for a mathematical analysis of the fluid behavior, a 2D geometry design was exposed and evaluated, with a mesh of 122 thousand elements in the interior of the domain and 21.5 thousand elements along its periphery, comparing the results obtained analytically with a computer program. Due to the characteristics and comparison with other inertial forces geometries, the straight serpentine geometry was chosen. By evaluating the behavior of the laminar flow and flow rate of the mixture, with the established boundary conditions, the design of the proposed microfilter was validated by implementing the selected geometry.

Introducción

El método de filtración por fuerzas inerciales es utilizado para depurar partículas en fluidos, mediante el uso de flujos controlados a altas velocidades de manera eficiente [1]. Es decir, la microfluidica inercial se basa en las propiedades intrínsecas de los fluidos para

lograr dicho efecto de las partículas.

Siendo así, esta técnica puede lograr una manipulación de partículas continua, de alto rendimiento y sin daño en las muestras. Así mismo, este método, se refiere al control de la migración lateral de partículas empleando la

misma inercia del fluido provocada por el diseño y geometría de los microcanales en el microcircuito. Desde 1961, el método de filtración por fuerzas inerciales es estudiado [2]. No obstante, desde ese entonces, se ha notado que tanto la geometría, distribución, tamaño y configuración de canal como el tipo de fluido influyen en la microfiltración por fuerzas inerciales [3]. Las fuerzas inerciales, emplean un enfoque generalmente analizado en 2D, es decir, las partículas se disponen en un único plano 2D en esta investigación [4]. Para lograr el estudio en 3D, se deben considerar diferentes morfologías o modificar la estructura del canal, sin embargo, con el estudio de tipo elastoinercial se puede lograr un análisis en 3D [5]. Gou, et al. [6] proponen un circuito microfluídico inercial que contiene canales en espiral con una estructura de expansión periódica. Los resultados experimentales muestran que cuando el flujo es de 750 $\mu\text{l}/\text{min}$, se puede separar más del 94% de las partículas. Sin embargo, en este microcircuito se observó que la deposición de partículas en los canales del microfiltro, obstruían el paso, provocando un ensuciamiento o bloqueo más rápido, lo que disminuiría la vida útil del filtro y no poder ser reutilizable. También, Shen, et al. diseñaron un sistema microfluídico inercial basado en canales en microespiral con un alto rendimiento (3 ml/min), y consiguiendo una pureza de filtración de muestras de = 96%. No obstante, se observó que, para mantener una alta eficiencia de separación, el sistema requiere un control preciso del caudal y de las condiciones de flujo, lo que añade complejidad en la operación y mantenimiento del equipo [7]. Por todo eso, se busca una forma de filtración inercial, a partir de un manejo ordinario y asequible de caudal del fluido con el fin de filtrar partículas en el fluido. También se expone, cómo el número de Reynolds (Re) y flujo volumétrico (Q) son una medida clave para evaluar la importancia de las fuerzas inerciales respecto a las viscosas.

1. Materiales y método.

El presente artículo tiene como objetivo principal evaluar numéricamente un sistema de filtración en microfluidos lab on a chip (LoC) por fuerzas inerciales, por lo que se requiere determinar el caudal adecuado para inducir el fluido a los efectos de las fuerzas inerciales en el microfiltro. Por tal razón, mediante el uso de la Ec.1..se propuso la primera condición de frontera (Flujo laminar) para el análisis numérico y así poder calcular el caudal donde las fuerzas inerciales comienzan a ser significativas comparadas con las fuerzas viscosas, lo que permite que las partículas sean desviadas de la corriente principal hacia áreas específicas del filtro, optimizando la filtración sin necesidad de membranas de poro extremadamente finas y costosas [8].

$$Re = \frac{Lv\rho}{\mu}$$

(1)

donde L es la distancia característica, μ es la viscosidad dinámica, ρ es la densidad, y v es la velocidad promedio de flujo del fluido. En función del número de Reynolds se propone un flujo Laminar $Re < 2000$ en este trabajo. En seguida, se verifica que el efecto inercial para este método de filtración, se pueda lograr primeramente cumpliendo con la relación de confinamiento (Ec.2):

$$\left(\frac{a}{D_H}\right) > 0.07$$

(2)

Siguiendo con la normativa ISO 15189:2012 [9] se propusieron las siguientes medidas de microcanales:

$$w \text{ (anchura)} = 300\mu\text{m} = 3 \times 10^{-4} \text{ m.}$$

$$h \text{ (altura)} = 200\mu\text{m} = 2 \times 10^{-4} \text{ m.}$$

Así, sustituyendo valores anteriores en la siguiente Ecuación 3, para el cálculo del diámetro hidráulico:

$$D_H = \frac{4 \cdot A}{P}$$

(3)

donde A es el área de sección transversal y P es el perímetro del canal. Sustituyendo:

$$D_H = \frac{4 \cdot (2 \times 10^{-4}) \cdot (3 \times 10^{-4})}{2 \cdot (2 \times 10^{-4} + 3 \times 10^{-4})} \approx 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m.}$$

Obteniendo así un cumplimiento de la relación de confinamiento. Utilizando este método de filtración pasiva, se aprovechó la propia dinámica del fluido para lograr un enfoque de alto rendimiento sin actuación externa, mediante un manejo ordinario y asequible de caudal y un bajo número de *Reynolds*.

Metodología

En esta investigación se buscó el desarrollo y validación numérica del microfiltro mediante el diagrama de flujo de la metodología sixsigma (Figura 1):

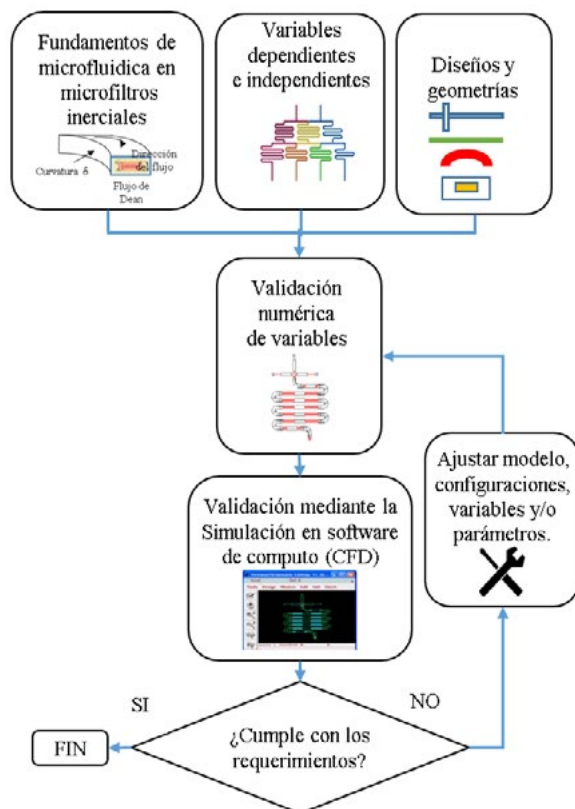


Figura 1 Metodología implementada para el desarrollo del microfiltro

Condiciones de frontera para la evaluación numérica del microfiltro.

En primer lugar, para cualquier sistema de flujo de fluido laminar-estacionario, el flujo debe de ser laminar, velocidad del fluido y flujo volumétrico constante [10], [11]. Entonces, para poder llevar a cabo el caso de estudio, los factores a considerar para garantizar la efectividad del proceso, de acuerdo con la norma IEC 60601-1[12], se propusieron las siguientes condiciones de operación para el estudio:

- $\rho_{fluido} \approx 1400 \text{ kg/m}^3$
- $\mu \approx 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Diámetro de partícula (a)
 $a \approx 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Temperatura (T), $T \approx 298 \text{ K}$

Sustituyendo en la siguiente Ecuación 4, se puede obtener la velocidad (v) en el microcanal.

$$v = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D_H}$$

(4)

Se obtiene que $v \approx 6.4 \text{ m/s}$.

•En segundo, se calculó el caudal (Q), la segunda condición de frontera para la evaluación numérica del microfiltro, mediante la Ecuación 5:

$$Q = v \cdot A$$

(5)

Obteniendo así un $Q \approx 3.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$. Derivado a las condiciones de frontera y cálculos anteriores, se asegura que, por los microcanales del filtro, circula un flujo laminar.

•En tercero, en la siguiente Tabla 1, se muestra una comparativa de las geometrías actuales

implementadas en microfiltros por fuerzas inerciales y sus principales características.

Tabla 1 Características de las diferentes geometrías actuales para el diseño de microfiltro por fuerzas inerciales.

Característica / Geometría	Microcanales Curvos	Microcanales Rectos	Geometría Serpentin	Geometría de Arquímedes	Referencia
Filtración Eficaz de Partículas	✓	✗	✓	✓	[14]
Facilidad de Fabricación y Escalabilidad	✗	✓	✓	✗	[15]
Control Preciso del Flujo	✓	✗	✓	✗	[16]
Mantenimiento y Limpieza Fácil	✗	✓	✗	✓	[17]

Del análisis de la anterior Tabla 1, se optó por la implementación de la geometría recta-serpentin para el desarrollo del microfiltro por fuerzas inerciales, debido a su eficacia de filtración, facilidad de fabricación, manejo del flujo, mantenimiento y flexibilidad en el diseño.

•Por último, se evaluó la caída de presión (ΔP) y la longitud del canal (L) del microfiltro por fuerzas inerciales. Utilizando dos modelos matemáticos clave, el modelo matemático de *Darcy-Weisbach*, que describe la caída de presión en función de la fricción y características geométricas del canal, y la ecuación de *Poiseuille* [21]. El factor de fricción f y la caída de presión ΔP , que dependen del número de *Reynolds* y de la rugosidad del canal, fueron despreciadas por lo pequeñas que son y con el fin de comparar este estudio con los realizados. Por lo que mediante la Ecuación 6:

$$L = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot Q}$$

(6)

Sustituyendo, se obtuvo una $L \approx 2.3 \times 10^{-7} m$, por lo que al obtener una longitud de canal L ,

se pudo estimar que a partir de una longitud de $2.3 \times 10^{-7} m$ se puede obtener un grosor del medio filtrante, es decir, esa longitud representa el recorrido efectivo que las partículas deben de atravesar mínimamente para el proceso de filtración.

2. Resultados y discusión.

Gracias al cálculo, al análisis matemático de las condiciones de frontera y al cumplimiento de la metodología sixsigma, se valoró una implementación de diseño para el sistema de filtración, atendiendo a diferentes formas, geometrías y disposiciones de cavidades. El siguiente 1er boceto de geometría del diseño del microfiltro (Figura 2) se adecuó a varios aspectos críticos que impactan directamente en los principios de filtración por fuerzas inerciales del previo análisis.

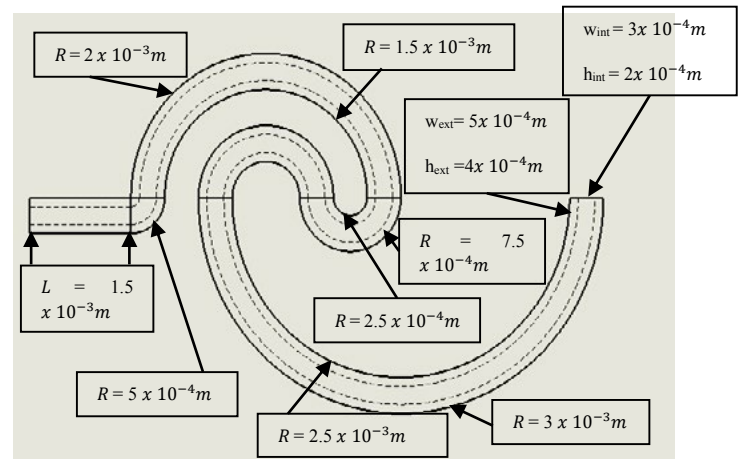


Figura 2 Vista frontal 2D del 1er Diseño en software de cómputo de geometría recta-serpentin para el microfiltro.

•Para el análisis y evaluación de la 1er geometría del diseño del microfiltro por fuerzas inerciales, se realizó el anterior diseño de geometría en el software de cómputo SolidWorks 2024. Finalmente, derivado de los ajustes de las condiciones de frontera y parámetros de simulación, se comparó el análisis y los cálculos realizados con los resultados obtenidos de la simulación del programa de cómputo (Figura 3).

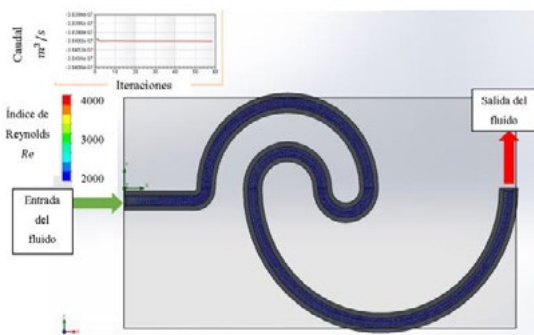


Figura 3 Validación numérica del caudal y número de Reynolds en SolidWorks Flow Simulation para la geometría recta-serpentina para el microfiltro.

• Como resultado se validó numéricamente con la ayuda del software de cómputo que el flujo volumétrico, a la salida de la geometría $Q \approx 3.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ con una velocidad de entrada de fluido $v \approx 6 \text{ m/s}$, teniendo un flujo laminar ($Re < 2000$) a lo largo de la geometría con un $D_H \approx 2.4 \cdot 10^{-4}$, con base en las medidas propuestas de acuerdo con la normativa ISO 15189:2012. Así, se validó la integración de la geometría recta-serpentina para el microfiltro, derivado de la comparación con los cálculos obtenidos.

• Así mismo, en la Tabla 2, se analizaron y se exponen diferentes diseños e implicaciones en la filtración, con el fin de proporcionar un diseño de microfiltro.

• En resumen, se confirmó la integración de la geometría recta-serpentina para el microfiltro, derivado de la validación numérica. También, la simulación de la geometría, permitió predecir y comprender el comportamiento hidrodinámico de partículas en función de las propiedades del fluido y las partículas a filtrar propuestas. La forma, el tamaño y la disposición de dicha geometría no solo influyó en la eficiencia de la filtración, sino que también determinó que las fuerzas inerciales afectan la trayectoria y filtración de partículas dentro del sistema mismo. No obstante, se observó que una incorrecta integración de geometrías, canales y/o trampas en el

microfiltro, pudo modificar el régimen del flujo (laminar, transición o turbulento) en función del número de Reynolds, lo que podría afectar el rendimiento final del sistema de filtración.

Tabla 2 Características de los diferentes diseños del microfiltro

Diseño	Característica del microfiltro
Diseño 1	Diseño base de 1 geometría inercial con salida de fluido circular y sin trampas, tuvo baja eficiencia de filtración, y no garantizó el correcto transporte de partículas.
Diseño 2	Diseño con 2 geometrías inerciales con salida de fluido recta y con trampas de reducción de canal. El diseño principalmente desvió el flujo, generando zonas de alta inercia que facilitaron la captura de partículas en la trampa circular, mejorando la eficiencia de separación sin obstruir el paso del fluido, acomodo de partículas a la salida. Se recomienda constante mantenimiento y supervisión de uso.
Diseño 3	Diseño con 3 geometrías inerciales con salida de fluido circular y con trampas de reducción de canal. Se caracterizó por generar múltiples zonas de alta inercia que desvían y redistribuyen el flujo, favoreciendo la filtración eficiente de partículas en la trampa circular, mientras las bifurcaciones dirigieron el fluido restante, optimizando el flujo sin obstrucciones.

• Derivado de resultados obtenidos mediante la simulación numérica y comparación de los 3 diseños de microfiltros, se seleccionó el Diseño 3 (Anexo I) sobre los otros debido a su capacidad superior para generar múltiples zonas de alta inercia, maximizando la captura

y filtración de partículas sin comprometer el flujo continuo del fluido, lo que lo hizo más eficiente y menos propenso a obstrucciones en aplicaciones de alta demanda de uso.

3. Resultados y discusión.

En conclusión, la evaluación numérica del microfiltro por fuerzas inerciales se pudo realizar, ya que los resultados obtenidos analíticamente son similares a los numéricos, de acuerdo con las investigaciones recientes, implementando 3 veces la geometría recta-serpentin con salida de fluido circular y con trampas de reducción de canal se pudo maximizar la eficiencia en la filtración de partículas a través de simulaciones computacionales (*Anexo 2*). Mediante esta simulación, se denotó la importancia de las fuerzas inerciales para aprovechar y desviar las partículas hacia áreas de captación específicas. Es decir, mediante la implementación de las 3 geometrías con la integración de elementos como crestas, trampas circulares y bifurcaciones, no se presentaron cambios en la velocidad ni de presión del fluido a lo largo del microfiltro. También, se determinó un flujo volumétrico, a la salida del microfiltro $Q \approx 3.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ totalmente asequible, con una velocidad de entrada de fluido $v \approx 6 \text{ m/s}$, teniendo un flujo laminar ($Re < 2000$) a lo largo de la geometría, con base en las medidas propuestas de acuerdo con la normativa ISO 15189:2012. Además, gracias a la descripción y análisis de las ecuaciones fundamentales que rigen el flujo de fluidos en microescala y como las fuerzas inerciales se logró desviar partículas hacia áreas de captación específicas

Finalmente se evaluó y validó el comportamiento de flujo laminar y caudal de la mezcla de agua, con las condiciones de frontera establecidas; garantizando el funcionamiento del microfiltro por fuerzas inerciales implementando la geometría

seleccionada a partir de un manejo ordinario y asequible de caudal del fluido.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios y a mi familia por el incondicional apoyo y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo otorgado y al Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), ESIME unidad Zacatenco Posgrado en Ingeniería Mecánica por la oportunidad de cursar esta maestría y por considerarme como participante de este Coloquio.

Igualmente agradezco al Dr. Christopher René Torres San Miguel y al Dr. Juan Alejandro Flores Campos por haberme brindado la oportunidad de compartirme su capacidad, apertura a su conocimiento científico y por la confianza que me brindaron para formar parte de su grupo de trabajo. A todos mis compañeros de maestría y doctorado por su ayuda y consejos durante el desarrollo de mi trabajo de investigación.

Referencias

- [1] D. Di Carlo, "Inertial microfluidics," *Lab on a Chip*, vol. 9, no.21, pp. 3038-3046, 2009.
- [2] Segré, G., and Silberberg, A. (1961). Radial particle displacements in Poiseuille flow of suspensions. *Nature* 189, 209–210.
- [3] Seo, K. W., Byeon, H. J., Huh, H. K., and Lee, S. J. (2014). Particle migration and single-line particle focusing in microscale pipe flow of viscoelastic fluids. *RSC Adv.* 4, 3512–3520.
- [4] Peng T, Qiang J and Yuan S (2024), Sheathless inertial particle focusing methods within microfluidic devices: a review. *Front. Bioeng. Biotechnol.* pp.3-10.
- [5] Zhang, J., Yan, S., Yuan, D., Alici, G., Nguyen, N. T., Ebrahimi

Warkiani, M., et al. (2016). Fundamentals and applications of inertial microfluidics: a review. *Lab. Chip* 16, 10–34.

[6] Gou, Y., S. Zhang, C. Sun, P. Wang, Z. You, Y. Yalikun, et al. Sheathless inertial focusing chip combining a spiral channel with periodic expansion structures for efficient and stable particle sorting. *Analytical Chemistry*, Vol. 92, No. 2, pp. 1833-1841, 2020.

[7] Shen, S., C. Tian, T. Li, J. Xu, S.W. Chen, Q. Tu, et al. Spiral microchannel with ordered micro-OBSTACLES FOR continuous and highly-efficient particle separation. *Lab on a Chip*, Vol. 17, No. 21, pp. 3578-3591, 2017.

[8] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 7th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.

[9] ISO 15189:2012, "Medical laboratories - Requirements for quality and competence," International Organization for Standardization, 2012.

[10] Córdoba, Diego. (2011). Las ecuaciones de Navier-Stokes. CSIC, Instituto de Ciencias Matemáticas.

[11] Mora, Xavier. (2017). Las ecuaciones de Navier-Stokes. *Mètode Science Studies Journal*, Universitat de Valencia, pp. 67-73.

[12] IEC 60601-1:2012, "Medical electrical equipment - Part 1: General requirements for basic safety and essential performance," International Electrotechnical Commission, 2012.

[13] Nagraath, S., Sequist, L. V., Maheswaran, S., Bell, D. W., Irimia, D., Ulkus, L. (2007). Isolation of rare circulating tumour cells in cancer patients by microchip technology. *Nature*. 450, pp. 1235– 1239.

[14] Wang, L., and Dandy, D. S. (2017). High-throughput inertial focusing of micrometer and sub-micrometer-sized particles separation. *Adv. Sci.* 4.

[15] Reece, A. E., and Oakey, J. (2016). Long-range forces affecting equilibrium inertial focusing behavior in straight high aspect ratio microfluidic channels. *Phys. Fluids* 28.

[16] Zhou, Y., Ma, Z., and Ai, Y. (2018). Sheathless inertial cell focusing and sorting with serial reverse wavy channel structures. *Microsystems Nanoeng.*

[17] Liu, C., Ding, B., Xue, C., Tian, Y., Hu, G., and Sun, J. (2016). Sheathless focusing and separation of diverse nanoparticles in viscoelastic solutions with minimized shear thinning.

[18] Xiang, N., Ni, Z., and Yi, H. (2018). Concentration-controlled particle focusing in spiral elasto-inertial microfluidic devices. *Electrophoresis* 39.

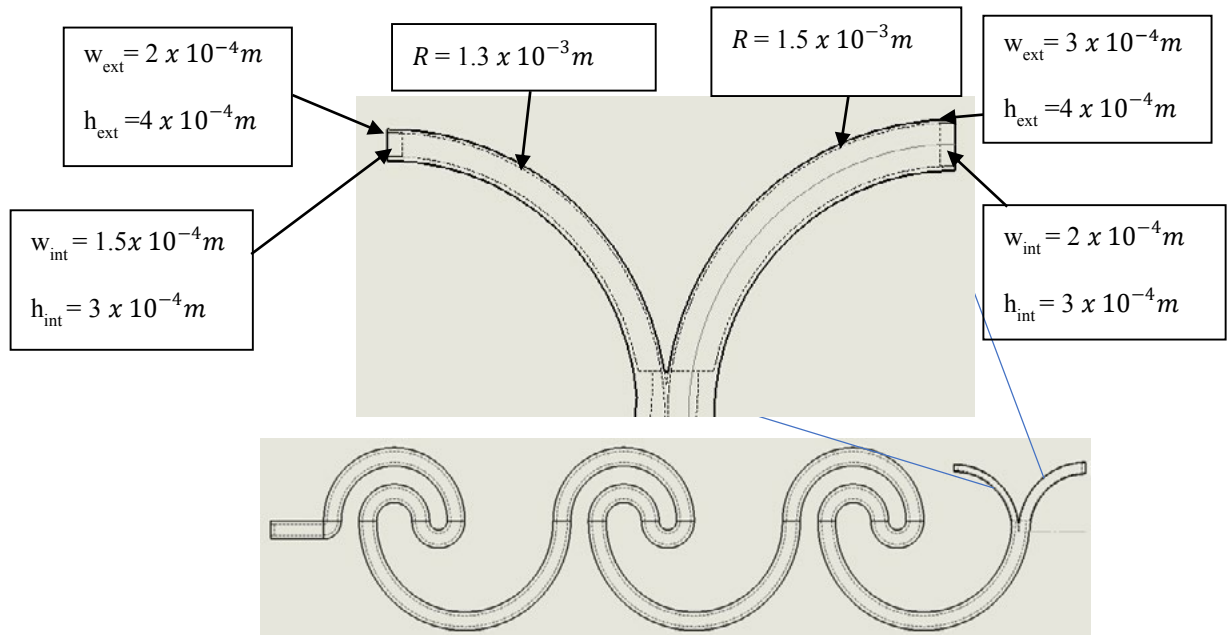
[19] Mukherjee, P., Wang, X., Zhou, J., and Papautsky, I. (2019). Single stream inertial focusing in low aspect-ratio triangular microchannels. *Lab. Chip* 19.

[20] S. Acharya, "Secondary Flows and Mixing in Curved Pipes," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 29, pp. 341-371, 1997.

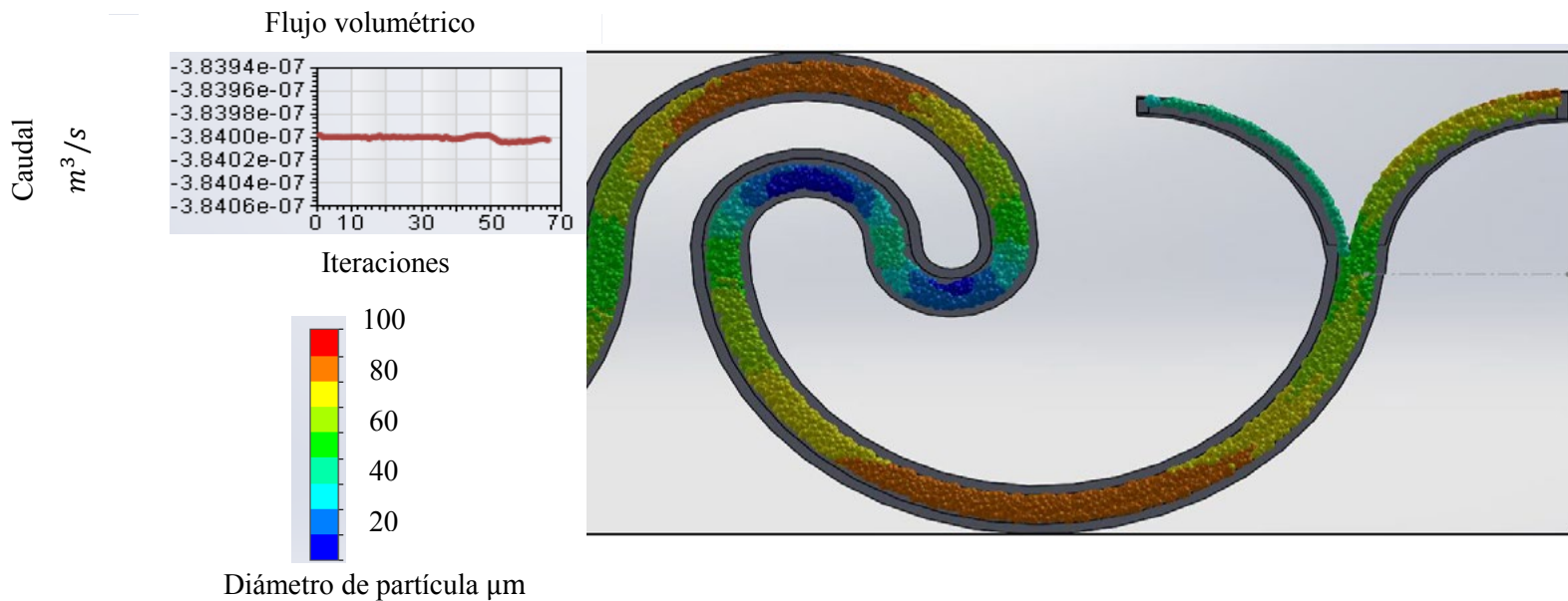
[21] Z. Gou, H. Zhang, A. Nait-Ouhra, M. Abbasi, A. Farutin, and C. Misbah, "Dynamics and rheology of vesicles under confined Poiseuille flow," *Soft Matter*, vol. 19, pp. 9101-9114, 2023.

Anexos.

Anexo 1. Medidas del Diseño 3 en 2D del microfiltro.



Anexo 2. Resultados de la validación numérica del Diseño 3 en 2D en el programa de cómputo del microfiltro.



Integración de Análisis de Segundo Orden en Estructuras Mediante Modelo JSON de SKYCIV

Integration of Second Order Analysis in Structures Using JSON Models from SKYCIV

Elizondo-Gómez Josué B. E.

Departamento de Posgrado de la Facultad de Ingeniería; Departamento de Diseño y Proyectos.

Universidad Autónoma de Querétaro.

administrativo@metric-edifica.com

Palabras clave: EST, Análisis, JSON, SKYCIV, Optimización.

Este artículo presenta una metodología para integrar el análisis de segundo orden en modelos estructurales utilizando archivos JSON (Java Script Object Notation) exportados desde el software en la nube SKYCIV. Utilizando programación en Python, se automatizan el análisis, diseño y optimización, reduciendo el esfuerzo manual y mejorando la precisión en comparación con métodos tradicionales. Se seleccionó un modelo de armadura, definiendo el material, la geometría y condiciones de carga, y se automatizó la manipulación de datos para evaluar los efectos de segundo orden en sistemas estructurales. La metodología permite la optimización estructural, logrando en este caso una reducción del 42% en el peso estructural utilizando el algoritmo de “Hill Climbing”. Este flujo de trabajo incrementa la precisión y eficiencia al minimizar la entrada manual y, por lo tanto, los errores. Los resultados muestran el impacto de implementar una metodología de análisis y optimización empleando herramientas de programación, confirmando la efectividad de esta integración para sistemas estructurales complejos. Esta metodología ofrece a los ingenieros una solución escalable y precisa para mejorar el proceso del diseño estructural.

Keywords: EST, Analysis, JSON, SKYCIV, Optimization.

This paper presents a methodology to integrate second-order analysis in structural models using JSON (JavaScript Object Notation) files exported from the cloud-based software SKYCIV. Through Python programming, analysis, design, and optimization processes are automated, reducing manual effort and enhancing accuracy compared to traditional methods. A truss model was selected with material, geometry and load conditions defined, and data manipulation automated to evaluate second-order effects in structural systems. This methodology allows structural optimization, achieving a 42% reduction in structural weight, for this case, using the “Hill Climbing” algorithm. This workflow significantly increases accuracy and efficiency by minimizing manual input and, thus, errors. The results show the impact of implementing a methodology for analysis and optimization using programming tools, confirming the effectiveness of this integration for complex structural systems. This methodology provides engineers with a scalable and precise solution to improve the structural design process.

1. Introducción

El análisis de segundo orden [1] es fundamental dentro del campo del arte de la ingeniería estructural, puesto que este permite evaluar el comportamiento real de un sistema estructural [2], en este caso de estudio una

armadura, bajo cargas y condiciones específicas de diseño. En contraste con el análisis estructural convencional, que asume que las deformaciones son pequeñas y despreciables, el análisis de segundo orden considera los efectos de las deformaciones en el comportamiento estructural [3], lo cual resulta crucial para estructural esbeltas y

complejas. Por lo tanto, esto implica un acercamiento del proceso de análisis a la realidad.

La utilización de herramientas computacionales como SKYCIV ha transformado el enfoque tradicional de análisis y diseño hacia la modelación estructural, facilitando la creación, análisis y optimización de modelos estructurales. Sin embargo, la integración efectiva de los resultados del análisis de segundo orden con estas herramientas requiere un enfoque de programación que permita manipular y analizar los datos de una manera eficiente.

Este trabajo presenta una metodología para realizar análisis de segundo orden en modelos estructurales programados en JSON para ser ejecutados usando tecnología API de SKYCIV. A través de un script de programación, se automatiza el proceso de análisis, validación y visualización de resultados, destacando la importancia de considerar los efectos de segundo orden en el diseño estructural. Los resultados obtenidos demuestran la aplicabilidad de esta metodología en la práctica de la ingeniería estructural, ofreciendo una solución eficiente [4].

2. Cuerpo (Metodología, modelo matemático, etc.)

Como primer paso fue seleccionado un modelo estructural representativo de una armadura, de modo que fueron configuradas las propiedades del material, geometría y condiciones de carga, asegurando que lo que ha de ser el modelo refleje estas condiciones realistas de diseño. Esta armadura puede ser observada en Fig. 1.

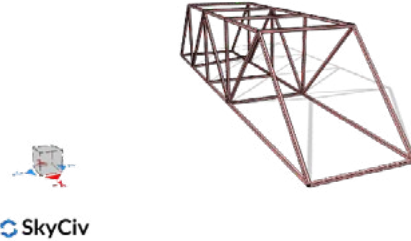


Figura 1. Modelo renderizado

La figura 1 muestra una armadura de arreglos triangulares que tiene componentes propios de las armaduras, cuerdas superiores, cuerdas inferiores y diagonales. Para realizar esta geometría fue necesario definir cada uno de los nodos que conforman el modelo para proceder a realizar la programación de las líneas con las que se modelaron los elementos. Con esto, fue posible realizar las definiciones de los apoyos. Ubicados en los puntos donde convergen las diagonales y conectan las cuerdas inferiores.

A la par de esto, fueron definidas las propiedades del material a usar, en este caso se tomó un acero A992.

Las condiciones de carga consideradas dentro del modelo fueron las cargas correspondientes a la acción puntual sobre nodos correspondientes a un vehículo ASTM HS-20-44, por lo que esta carga corresponde a 35.6kN en los nodos extremos y a 71.2kN en los puntos que comparten ancho tributario.

Fueron consideradas cargas de viento [5] arbitrarias de 20kN, 18.028kN aplicadas a 45° de inclinación. Para dar efecto de succión del viento, fueron consideradas cargas distribuidas sobre elementos verticales de una magnitud de 7.071kN/m aplicadas a lo largo del elemento. Realizando un total de 9 combinaciones de diseño, considerando el estado límite de falla y una combinación para el estado límite de servicio.

La Fig. 2 muestra una ejemplificación de la aplicación del conjunto de cargas mencionadas en el párrafo anterior.

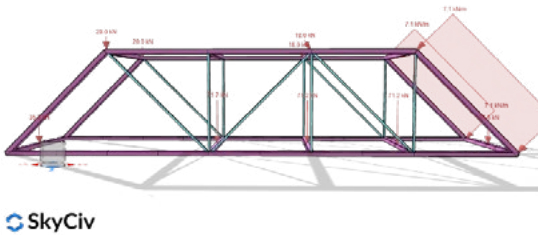


Figura 2. Aplicación de cargas en modelo analítico

conforman una armadura que sería usada en un procedimiento de análisis tradicional.

Se elaboró un script en Python para poder correr el archivo JSON [6]. A partir de esto, el script ya tenía la capacidad de interpretar las configuraciones del modelo, extrayendo los datos clave para realizar el análisis de segundo orden.

La aplicación del análisis de segundo orden

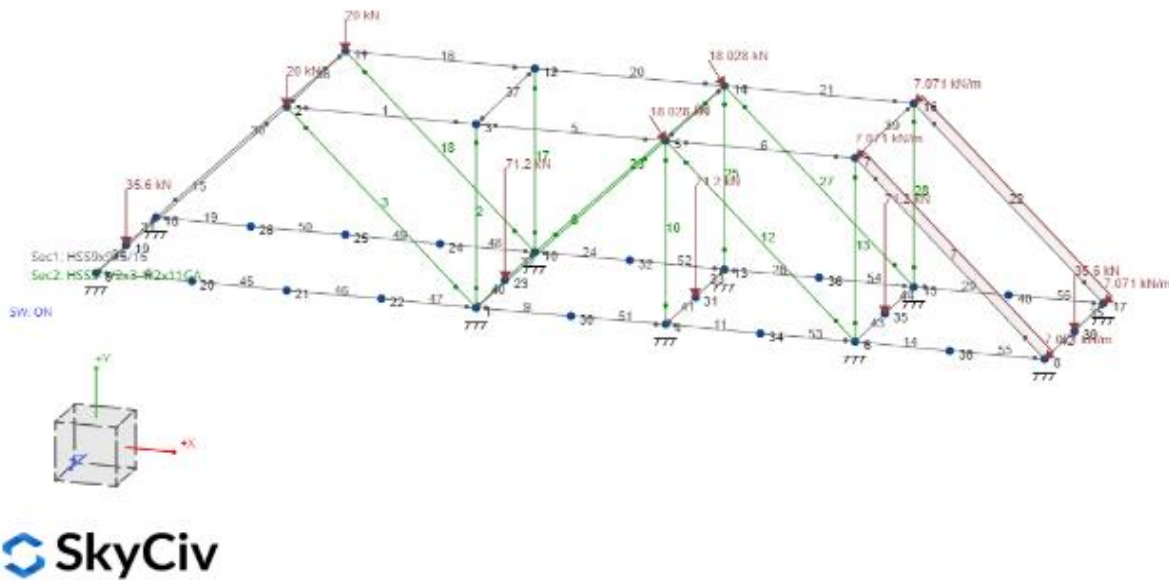


Figura 3. Modelo discretizado con cargas aplicadas

La Fig. 3 muestra los nodos definidos dentro del script en Python mostrando una gama diferente de colores para diferenciar los diferentes elementos que conforman el modelo de la armadura. Además, se observa que los apoyos fueron definidos como empotrados. Para modelar correctamente los grados de libertad dentro del análisis para la estructura, la Fig. 3 muestra nodos en color verde cercanos a los nodos que unen elementos, diferenciando así los nodos que tienen menos grados de libertad, informando así que estos elementos no transmiten momento, concordando con las consideraciones de la matriz de rigidez para elementos que

como parte del flujo de programación en Python fue incluido dentro del script, posterior a la interpretación de las configuraciones del modelo.

Así, se implementaron algoritmos iterativos para cálculos los desplazamientos y fuerzas internas, teniendo en cuenta los efectos de segundo orden. Dentro de este proceso fueron consideradas dos secciones, separadas por el código de colores mostrado también en la fig. 2, de modo que para el análisis inicial fueron consideradas las secciones rosas como HSS14x14x1/4, que será llamada sección 1, y para las secciones cian se consideró un HSS6X6X5/8, que será llamada sección 2. El

proceso de obtención de resultados del análisis estructural consideró el procedimiento “Hill-Climbing”.

Para la validación de resultados obtenidos del análisis de segundo orden fue implementada una función de optimización para mejorar los kilos de estructura necesarios para realizar la ejecución física de este modelo estructural teórico. El proceso de optimización es aplicado por medio de cambiar las secciones propuestas, en el párrafo anterior, a las obtenidas con el algoritmo de optimización. Para este proceso fueron consideradas las secciones propuestas en el catálogo “americano AISC” para secciones rectangulares HSS.

El código para desarrollar la optimización considera un proceso de optimización del método “Hill Climbing”. Este algoritmo corresponde a una búsqueda heurística que busca soluciones optimas locales en problemas de optimización, que en este caso es mejorar los kilos de estructura a utilizar [7]. Este es un método iterativo que progresivamente busca mejorar la solución propuesta evaluando las soluciones vecinas para llegar al punto donde no exista alguna otra solución.

Para el caso actual de estudio se considera como función objetivo Ec. (1), que representa el peso total de la estructura.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n A_i * p_i * L_i \quad (1)$$

Los términos corresponden al producto de las áreas de las secciones transversales por la densidad y por la longitud.

La generación de vecinos es dada por medio de la Ec. (2). Estos vecinos son generados mediante la adición de una perturbación a los que se considere como solución actual.

$$x_{nuevo} = \sum_{i=1}^n x_{actual} + \Delta x \quad (2)$$

Para esta función fue considerado un índice de utilidad del 95% empleando una revisión de la sección con el código AISC-360-16-LRFD y literatura afin [8].

De este modo, para el análisis y visualización, fueron generadas representaciones para observar la estructura de diferentes condiciones de carga, destacando las variaciones de desplazamiento y esfuerzo en función del análisis realizado.

3. Resultados y discusión

Derivado de la elección de geometría para el presente análisis se presenta en la Fig. 3 de una forma discretizada con el fin de ejemplificar la representación de del sistema estructural en análisis.

Para finalizar el script programado en Python, se obtuvo un código con el cual fue posible obtener de forma visual la serie de resultados del análisis estructural con las secciones propuestas.

Fig. 4 muestra una vista de las fuerzas internas axiales derivadas de la combinación de diseño más crítica sobre la estructura.

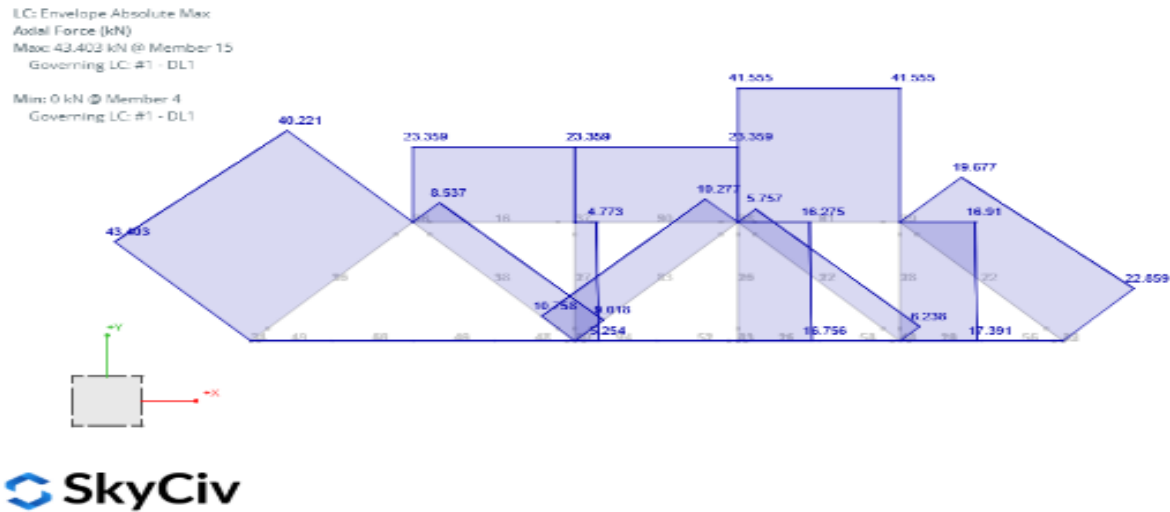


Figura 4. Obtención de fuerzas internas en la armadura

Esto fue producto de la aplicación del análisis de segundo en el sistema estructural y proceso de validación dentro del script para la API de SKYCIV. Ahora bien, es importante no confundir con cargas gravitacionales, puesto que las fuerzas mostradas en la Fig. 4 actúan directamente dentro de la estructura.

Cabe mencionar que las secciones fueron propuestas a partir de la experiencia del autor para referir un rango de iteraciones para la optimización de carácter medio. Esto implica que las dos secciones elegidas rondaron en propiedades que se encontraban cercanas a la sección obtenida como optimización, hablando del peso, para el perfil de la sección 1; mientras que para el perfil de la sección 2 se optó por escoger un perfil cuyo peso y

propiedades mecánicas sobrepasaban en gran manera aquellas necesarias para soportar las sollicitaciones de diseño consideradas para este análisis.

Como parte del proceso de optimización fue obtenida una optimización obtenida una mejora de peso de materiales [9] necesarios del 42%. De modo que este proceso de optimización realizado por medio de un script JSON para SKYCIV fueron realizadas 56 corridas para la sección 1 y 27 corridas para la sección 2. Estos resultados se pueden observar en Fig. 5 donde se observan que las nuevas secciones 1 y 2 redujeron la sección en 5 pulgadas y 2.5 pulgadas por lado, respectivamente, en adición al espesor de las secciones.

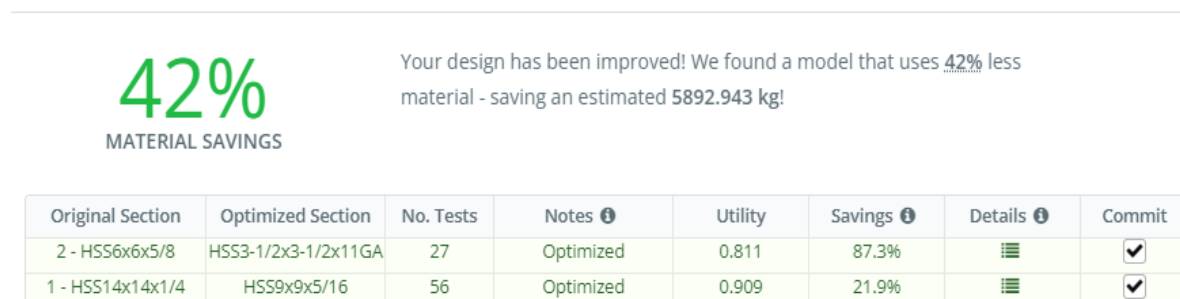


Figura 5. Resultados obtenidos del proceso de optimización.

Por otro lado, se observan que la cantidad de iteraciones fue de 56 y 27 para la sección 1 y 2, respectivamente.

4. Conclusiones

El presente artículo ha abordado la integración del análisis de segundo orden en modelos estructurales a través de archivo JSON y la API de SKYCIV, destacando la importancia de este enfoque en la práctica de la ingeniería estructural. Sin embargo, para fortalecer las afirmaciones realizadas, se requiere una comparación más detallada con métodos tradicionales de análisis estructural.

A través de la programación en Python, se redujo el esfuerzo manual y mejorar la precisión de resultados. La metodología implementada no solo permite obtener de manera eficiente tanto los desplazamientos como las fuerzas internas, sino que también ofrece la posibilidad de realizar optimizaciones basadas en el peso total de la estructura, como se demostró con la reducción del 42% en el peso total de las secciones optimizadas.

En primera instancia, fue posible la reducción de peso estructural. Esto es, se logró optimizar el peso total de la estructura mediante la utilización del algoritmo “Hill Climbing”, así reduciendo el material requerido en un 42% sin comprometer la seguridad y desempeño estructural. Este resultado confirma la efectividad de la metodología para obtener soluciones estructurales más eficientes [10]. Realizar las 56 y 27 pruebas para la sección 1 y la sección 2 implica un proceso largo al ser realizado con un análisis estructural tradicional, mientras que al ser realizado con esta metodología es posible depender únicamente del tiempo de respuesta de banda del equipo con que se cuente para realizar la programación y compilar en el API de SKYCIV.

En segundo lugar, la programación de flujo de trabajo en Python por medio de la automatización de un proceso utilizando archivos JSON permiten una integración directa con la API de SKYCIV, eliminando la necesidad de una intervención manual y reduciendo el margen de error que conlleva una modelación. De esta forma, mejorando el proceso de análisis y su precisión.

En tercer lugar, fue demostrado que es posible implementar métodos de análisis y optimización alternativos a los tradicionales para evaluar la efectividad de estos en diferentes contextos de modo que las afirmaciones presentadas con respecto a la efectividad de esta metodología puedan ser comparadas detalladamente.

A pesar de los resultados positivos, la metodología presentada tiene ciertas limitaciones que deberán ser abordadas en futuros trabajos. La simplificación de la geometría y las cargas aplicadas se realizó con el fin de facilitar el desarrollo del script en Python, lo cual limita la aplicación directa a sistemas estructurales más complejos y apegados a la realidad. Además, a pesar de que la optimización fue exitosa en términos de peso estructural, se podrían explorar métodos alternativos como algoritmo evolutivos o técnicas de optimización global para evaluar su eficacia comparativa en la reducción del peso estructural y en la mejora del desempeño global.

Para futuros trabajos, se sugiere ampliar el modelo estructural a sistemas estructurales de múltiples niveles, de modo que sea posible evaluar y analizar el comportamiento bajo condiciones dinámicas. Por otro lado, sería valioso integrar la metodología con otras herramientas de análisis como OpenSeesPy, lo cual permitiría una evaluación más detallada de los modos de inestabilidad y fenómenos de bifurcación en estructuras complejas.

En conclusión, la integración de archivos JSON con herramientas de análisis computacional avanzadas como lo es SKYCIV y su programación en Python, proporciona una alternativa robusta y eficiente para la evaluación de los efectos de segundo orden en estructuras. Esta metodología no solo facilita la validación y el diseño estructural, sino que también aporta flexibilidad para realizar análisis y optimizaciones más avanzadas, contribuyendo de manera significativa a la práctica de la ingeniería estructural moderna y reduciendo el error humano que se aprecia en numerosas ocasiones en los modelos de análisis estructural que emplean softwares o métodos convencionales. La precisión que requiere realizar la programación de estos procesos demanda más atención por parte del diseñador, de modo que tanto la automatización y el uso de herramientas computacionales no solo mejoran la precisión del análisis estructural, incluyendo el de segundo orden, y del proceso de optimización sino que también representa un avance significativo en la práctica de la ingeniería estructural moderna puesto que incita a los diferentes diseñadores estructural a evaluar la efectividad de esta metodología en diferentes contextos.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la H. Universidad Autónoma de Querétaro y en específico al Departamento de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería por la oportunidad de poder realizar este trabajo y a mi empresa: Isótropo, Edificación y Proyectos S. de R.L. de C.V. por ser la única entidad en realizar el financiamiento de mis estudios de posgrado y el pago del cloud-based software

SKYCIV para poder llevar adelante este trabajo.

Referencias

- [1] W. Ouyang, L. Chen, S. Liu, "Neural Networks-based spring element for second-order analysis of pile-supported structures with nonlinear soil-structure interaction," *Engineering Structures*, vol. 310, 118093, 2024.
- [2] K. M. Gondaliya, S. A. Vasanwala, A. K. Desai, J. A. Amin, "Machine learning-based approach for assessing the seismic vulnerability of reinforced concrete frame building," *Journal of Building Engineering*, vol. 97, 110785, 2024.
- [3] V. Piluso, "Critical analysis of seismic codes' provisions on second order effects," *Engineering Structures*, vol. 308, 117931, 2024.
- [4] Z. Yang, M. Li, Y. Sun, S. Huang, Q. Ma, J. Cui, "A second-order homogenization for nonlinear structures with periodic configurations in cylindrical coordinates," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 119, pp. 1-26, 2023.
- [5] C. Z. Bin Zahid, M. Ul Kabir, M. Z. Rafid, T. Mustafa, M. M. Rezwan, H. M. Ashiq, "Testing of light-frame wood structure due to wind loading: A review," *Progress in Engineering Science*, vol. 1, 100019, 2024.
- [6] E. Chavarriaga, F. Jurado, F. D. Rodríguez, "An approach to build JSON-based domain specific languages solutions for web applications," *Journal of Computer Languages*, vol. 75, 101203, 2023.
- [7] T. Jiang, G. Ren, X. Zhao, "Evacuation route optimization based on tabu search algorithm and hill-climbing algorithm," *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp. 865-872, 2013.
- [8] Y. Fang, J. Pan, F. Hu, J. Ning, "Multi-objective optimization method for steel frame with top-and-seat angles considering yield control," *Journal of Construction Steel Research*, vol. 218, 108718, 2024.
- [9] D. Villalba, J. Paris, I. Couceiro, I. Colominas, F. Navarrina, "Topology optimization of structures considering minimum weight and stress constraints by using overweight approach," *Engineering Structures*, vol. 273, 115071, 2022.
- [10] S.H. Hsien, S. Modak, E. D. Sotelino, "Object-oriented parallel programming tools for structural applications" *Computer Systems in Engineering*, vol. 6, pp. 533-548, 1995.

Optimización de armadura tipo puente mediante métodos metaheurísticos.

Optimization of bridge-type truss using metaheuristic methods.

Hernández Martínez Juan Manuel, Ibarrola Pacheco Alejandro, Pérez Martínez José Luis

*Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Santiago de Querétaro, México.
jmhdzmtz96@gmail.com*

Palabras clave: EST, Optimización por algoritmos metaheurísticos, diseño estructural, estructuras de acero, cargas vivas vehiculares, Python.

Resumen- El uso de algoritmos metaheurísticos ha ganado popularidad en los últimos años dentro de la ingeniería estructural, teniendo como principal objetivo la optimización de recursos, como los materiales de construcción que componen las estructuras. En este artículo se presenta una comparativa entre los algoritmos de las luciérnagas, enjambre de partículas y el lobo gris, aplicados al diseño estructural en acero de una armadura plana de 30 metros, la cual soportará cargas vivas vehiculares. Se realizó el análisis estructural y el diseño a tensión-compresión utilizando el lenguaje de programación Python, y se analizó la sección más ligera para evaluar su comportamiento mediante el análisis no lineal estático Pushover en Python, con el fin de determinar la capacidad de la estructura optimizada. Los resultados obtenidos indican que es posible realizar el diseño óptimo de la armadura debido a que se obtienen relaciones de esfuerzo-capacidad cercanas a la unidad. Además, se observó el algoritmo de Lobo gris requiere un 80% menos de procesamiento computacional en comparación con los otros.

Keywords: Optimization using metaheuristic algorithms, structural design, steel structures, rural vehicular bridge, vehicular live loads, Python.

Abstract- The use of metaheuristic algorithms has become more popular in recent years in structural engineering, with the main goal of optimizing resources, like the materials used for construction. This article compares the Fireflies algorithm, Particle Swarm Optimization, and Grey wolf algorithm, applied to the steel design of a 30-meter flat truss, which will support vehicular live loads. The structural analysis and tension-compression design were done using Python, and the lightest section was tested to evaluate its behavior with a nonlinear static Pushover analysis in Python to determine the capacity of the optimized structure. The obtained results indicate that it is possible to achieve the optimal design of the truss since stress to capacity ratios are close to the unit. Additionally, it was observed that the Grey Wolf algorithm requires 80% less computational processing than the others.

1. Introducción

La optimización en el diseño estructural es una disciplina crucial en la ingeniería civil y estructural, con el objetivo de mejorar la eficiencia y funcionalidad de las estructuras mientras se cumplen los requisitos normativos.

Consiste en hacer un ensamble de materiales destinados a sostener cargas de la mejor manera [1], esto significa que la estructura sea lo más ligera posible, es decir, minimizar su peso. Por lo tanto, un conjunto de parámetros que definen el rendimiento estructural podría estar conformado por el peso, rigidez, carga

crítica, esfuerzos, desplazamiento y geometría [2].

La optimización debe ser basada en una función objetivo multivariable [3]. En este contexto, los algoritmos metaheurísticos han emergido como herramientas poderosas para abordar problemas complejos de optimización [4].

Los algoritmos metaheurísticos son conocidos como algoritmos aproximados de propósito general, que se definen como un proceso iterativo que combina distintos aspectos para explorar y explotar el espacio de búsqueda [5].

Permiten resolver problemas de optimización combinatoria y son capaces de ofrecer soluciones a una amplia gama de problemas difíciles de abordar en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Se dividen en dos grandes grupos, los basados en un punto y los que se basan en poblaciones de puntos [6].

Los algoritmos metaheurísticos, comparados en este artículo corresponden a los del grupo que se basa en poblaciones de puntos, tales como el algoritmo de las luciérnagas, enjambre de partículas y el de lobo gris.

El algoritmo de las luciérnagas, fue introducido en 2009 por Xin-She Yang, quien se inspiró en el comportamiento y las características de las luciérnagas, como su parpadeo [7].

El algoritmo de las luciérnagas (FA), se inspira en el comportamiento intermitente y rítmico de las luciérnagas, que son insectos alados capaces de producir destellos de luz para atraer posibles presas o compañeros. En las aplicaciones del algoritmo de luciérnagas (FA), se debe configurar una población inicial de luciérnagas en ubicaciones de nodos aleatorios definidas como un espacio de búsqueda, donde las luciérnagas representan una solución factible. La intensidad del destello de luz de cada luciérnaga es la forma

de evaluar la función objetivo que se va a optimizar [8].

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO), desarrollado en 1995 por James Kennedy y Russell Eberhart [9]. A diferencia de los algoritmos genéticos, que imitan la evolución biológica, el PSO se enfoca en la simulación de la cooperación entre individuos dentro de un grupo para encontrar soluciones óptimas [10].

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas se inspira en la evolución en el comportamiento colectivo, principalmente trata de imitar el comportamiento social de varios grupos de animales como lo son los cardúmenes, parvadas, manadas, etc [11].

El algoritmo de optimización del lobo gris (GWO) es un algoritmo metaheurístico de optimización, basado en inteligencia colectiva y desarrollado por Seyed Mohammad Mirjalili en 2014 [12]. Está inspirado en el comportamiento social de las manadas de lobos grises y su organización para la actividad de caza de presas [13].

A través del análisis elastoplástico, se puede capturar la transición del comportamiento elástico al inelástico, lo que es crucial para comprender la respuesta de la estructura ante cargas extremas [14].

Este método permite un análisis detallado del comportamiento estructural, abarcando tanto la fase elástica, donde las deformaciones son reversibles, como la fase inelástica, donde se producen deformaciones permanentes [15].

Los resultados del análisis pueden visualizarse en gráficos que muestran la relación entre la carga aplicada y los desplazamientos, permitiendo a los profesionistas del rubro, evaluar la capacidad de la estructura.

En este artículo se hace una comparativa entre algoritmos metaheurísticos enfocados en la optimización del diseño estructural en

elementos de acero, para la obtención de secciones estructurales óptimas. Se obtendrá el perfil estructural más ligero y se evaluará su comportamiento no lineal a tensión-compresión, mediante el método elastoplástico.

2. Cuerpo (Metodología, modelo matemático, etc.)

Algoritmo de las luciérnagas

Para el método de optimización metaheurístico del algoritmo de las luciérnagas se tomó como inspiración la luminosidad de las luciérnagas en las vistas de verano del cielo en zonas tropicales y de temperaturas cálidas. Las luciérnagas tienen diferentes destellos de luz, los cuales parpadean según ciertos ritmos donde se busca tanto atraer a sus presas como para comunicarse entre sí [16].

Dentro del algoritmo de las luciérnagas se establecen tres parámetros diferentes:

El parámetro α , que controla el grado de exploración en el espacio donde se encuentra la población. Cuando se tienen valores altos de este parámetro se obtendrán búsquedas con un nivel de aleatoriedad o ruido mayor. Tener una alta aleatoriedad tiene la ventaja de disminuir los mínimos o máximos locales que llegue a tener la función objetivo, sin embargo, es posible que no se requiera tener incrementos o cambios de solución tan abruptos, por ejemplo, cuando se tiene un espacio de búsqueda o población finito.

El parámetro β se encarga de definir que tan fuerte es la atracción entre las luciérnagas, influenciando el movimiento de estas para evitar o provocar, según sea el valor del parámetro, que se junten de forma rápida en una solución.

El parámetro γ se encarga de controlar la atracción entre las luciérnagas según la

distancia que hay entre ellas. Cuando se tiene un valor alto de este parámetro significa que la atracción disminuye rápidamente con la distancia, en cambio, al tener un valor bajo significa que la atracción es más uniforme sin importar que la distancia sea corta o larga.

La Ec. (1) indica el movimiento entre las luciérnagas.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 * e^{-\gamma * r_{ij}^2} * (x_j^t + x_i^t) + \alpha_t * \epsilon_i^t \quad (1)$$

Donde:

x_i^{t+1} : Es la nueva posición de la luciérnaga, después de la iteración donde se involucran todos sus parámetros.

x_i^t : Es la posición original de la luciérnaga antes de introducir la nueva iteración.

r_{ij}^2 : Es la distancia entre la luciérnaga actual y la siguiente.

ϵ_i^t : Es un valor que viene normalmente de una distribución uniforme o gaussiana que introduce sesgo o ruido al algoritmo para evitar que se estanque en mínimos locales dentro de la solución.

Algoritmo de enjambre de partículas

El método de optimización global busca soluciones óptimas en diversos tipos de espacios en especial en multidimensionales, aunque es posible que se presenten en dimensiones bajas, se especializa en dimensiones de orden mayor a tres, donde se busca tener en cuenta dos posiciones, la mejor posición individual y la mejor posición global.

Entonces tendremos un registro de cada partícula donde se elegirá la mejor posición en cada iteración, denominado como p_{best} , también tendremos conocimiento de la mejor solución encontrada por cualquier partícula, denominada por g_{best} [9].

Las partículas tendrán dos propiedades importantes:

Posición x_i^t : Representa la posición actual de la partícula en la iteración t , aún no se ve influenciada por el algoritmo en la nueva iteración.

Velocidad v_i^t : Controla el movimiento de la partícula en cada una de las iteraciones, la cual tiene un ajuste según los registros individuales y globales de la partícula. La velocidad de la partícula va a ser un vector que determinará su dirección y magnitud influenciado por tres propiedades, las cuales se describen a continuación.

La Inercia ωv_i^t , esta propiedad representa la tendencia de la partícula a continuar con el movimiento que realizó en la iteración anterior. Es un balance entre la exploración del espacio y la explotación del lugar de búsqueda, algo similar al valor de alfa en el algoritmo de las luciérnagas.

Componente cognitivo, este término representa la experiencia individual de la partícula, es decir va a buscar moverse hacia la mejor posición personal que ha tenido a través de las iteraciones, Ec. (2).

$$c_1 r_1 (p_{best,i} - x_i^t) \quad (2)$$

Componente social, este término hace alusión al mejor desempeño global del enjambre, esto provocará que la partícula se mueva hacia donde el enjambre ha encontrado la mejor solución como grupo, Ec. (3)

$$c_2 r_2 (g_{best} - x_i^t) \quad (3)$$

La Ec. (4) determina la posición de cada partícula.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (4)$$

Donde v_i^{t+1} corresponde a:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_{best,i} - x_i^t) + c_2 r_2 (g_{best} - x_i^t) \quad (5)$$

Algoritmo de lobo gris

El algoritmo simula una estructura de jerarquías de una manada de lobos donde se adoptan roles para rodear y atrapar a sus presas. Cada posición de los lobos representa una solución del espacio de búsqueda y la presa significa la solución óptima que tratamos de cazar con el algoritmo [13].

Dentro del algoritmo tenemos cuatro categorías de jerarquía:

Lobo alfa α : Representa la mejor solución encontrada hasta la iteración actual. El lobo alfa tiene una mayor influencia que todos los tipos de lobos, debido a su cercanía de la solución óptima.

Lobo Beta β : Representa la segunda mejor solución encontrada hasta la actual iteración. El lobo beta va a liderar a los demás lobos, pero asistirá en el proceso de caza al lobo alfa.

Lobo Delta δ : Es la tercer mejor solución o el tercer mejor lobo. El lobo delta sigue las instrucciones de los lobos alfa y beta, además, puede liderar ante la ausencia de los lobos alfa y beta.

Lobo Omega ω : Los lobos omegas son las soluciones restantes, y su trabajo es seguir a los tres lobos líderes y ayudan a explorar el espacio donde se pueden elegir soluciones.

Las estrategias de caza en los lobos siguen el patrón de tres pasos, búsqueda, rodeo y ataque a la presa. El primer paso del algoritmo es buscar soluciones posibles, a medida que se encuentren mejores soluciones, los lobos irán tomando jerarquías. Cuando se tenga una posible solución, los lobos empezarán a rodear a la presa, acercándose gradualmente a la posición en la que se encuentra esta solución, para finalmente atacar, lo cual significa que la aleatoriedad que se tenía para la búsqueda de

soluciones se quitará gradualmente y se intensificará el refinamiento en la solución identificada.

Para rodeo de presa, se utilizan las Ecs. (6-7).

$$\vec{D} = |\vec{C} * \vec{X}_{presa}(t) - \vec{X}(t)| \quad (6)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{presa}(t) - \vec{A} * \vec{D} \quad (7)$$

Donde:

$\vec{X}(t)$: Es la posición del lobo.

$\vec{X}_{presa}(t)$: Es la posición de la presa o mejor solución.

$\vec{A}$ y $\vec{C}$: Son coeficientes que controlan la convergencia hacia la presa, se calculan de acuerdo a las Ecs. (8-9)

$$\vec{A} = 2 * \vec{a} * \vec{r}_1 - \vec{a} \rightarrow s \quad (8)$$

$$\vec{C} = 2 * \vec{r}_2 \quad (9)$$

Donde:

$\vec{a}$ decrece linealmente de 2 a 0 durante las iteraciones.

$\vec{r}_1$ y $\vec{r}_2$ son vectores aleatorios en el rango de [0,1].

$\vec{D}$: Es la distancia entre el lobo y la presa

Para actualizar la posición de los lobos se usa la Ec. 10.

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (10)$$

Donde los valores de $\vec{X}_n$ son las posiciones actuales de los lobos alfa, beta y delta.

3. Resultados y discusión

Se desarrolló un programa en Python que generó la geometría de la estructura, aplicó las cargas y definió las propiedades del material, así como las condiciones de frontera. Además, se obtuvieron los elementos mecánicos de la estructura y las deformaciones del sistema. A continuación, se muestra la configuración estructural de la armadura con las cargas aplicadas (Figura 1), los esfuerzos axiales en las barras (Figura 2) y la configuración deformada (Fig. 3). Los resultados de la deformación se muestran en la Tabla 1 para cada perfil obtenido por algoritmo.

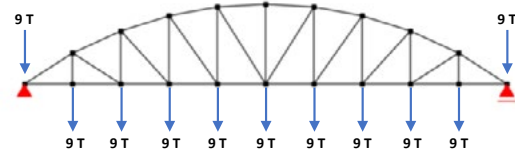


Figura 1. Configuración estructural de armadura

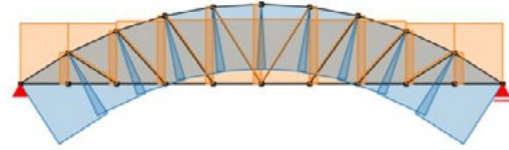


Figura 2. Esfuerzos axiales

Tabla 1. Comparativa de resultados obtenidos por cada algoritmo

Algoritmo	Iteraciones	Individuos	Perfil óptimo	Área (cm)	Peso de armadura (ton)
Luciérnaga	30	50	HSS 6x6x1/4''	33.80	3.55
Enjambre de partículas	20	50	HSS 6x6x1/4''	33.80	3.55
Lobo gris	20	10	HSS 6x6x1/4''	33.80	3.55

A través de los tres algoritmos estudiados en este artículo se obtuvieron los perfiles optimizados, y el peso total de la armadura. De acuerdo a la Tabla 1, se puede apreciar que los tres algoritmos arrojan el mismo perfil como mejor solución, la diferencia es el número de individuos e iteraciones considerados en cada uno, siendo el algoritmo de PSO el que converge con mayor rapidez a la solución óptima, mientras que el algoritmo de GWO es el que requiere de menor población, por otro lado, el algoritmo de FA es el que requiere de un número mayor de iteraciones y población para converger a la solución óptima.

En las Figs. 3-5, se muestran las gráficas de iteraciones y convergencia de la evaluación de aptitud hasta la solución óptima para cada algoritmo.

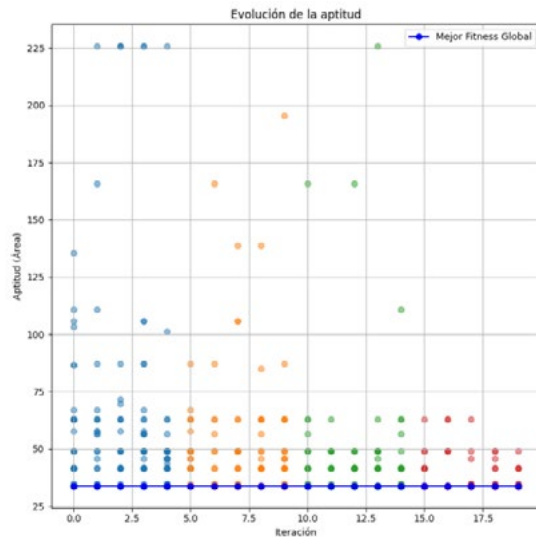


Figura 3. Convergencia de la función fitness por el método PSO considerando 20 iteraciones y 50 individuos

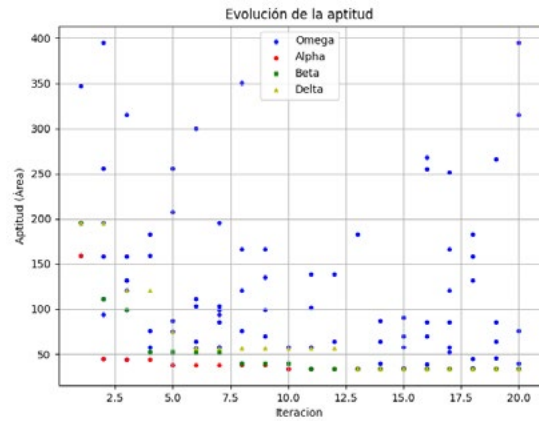


Figura 4. Convergencia de la función fitness por el método GWO considerando 20 iteraciones y 10 individuos

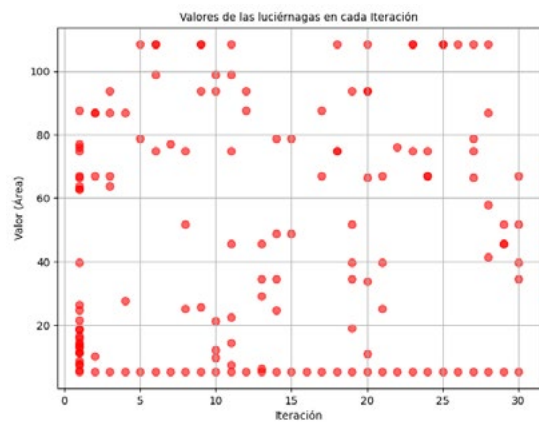


Figura 5. Convergencia de la función fitness por el método FA considerando 30 iteraciones y 50 individuos

Una vez obtenido el perfil más ligero se procedió a realizar nuevamente el análisis estructural en Python de la armadura considerando el área de la sección optimizada para obtener la deformación real del sistema, la cual se muestra en la fig. 6.

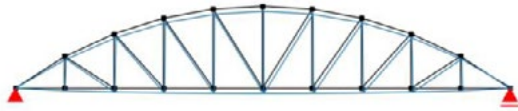


Figura 6. Deformación máxima al centro del claro

La deformación máxima que se obtuvo al centro del claro fue de 7.2 cm, considerando que el puente tiene 30 m de claro, se cuenta con una deflexión permisible de $300/240=12.5$ cm, por lo tanto, la sección cumple.

Posteriormente, mediante un análisis no lineal elastoplástico en Python, se evaluó el perfil HSS 6x6x1/4'', con la finalidad de determinar la capacidad en el rango inelástico de la estructura optimizada.

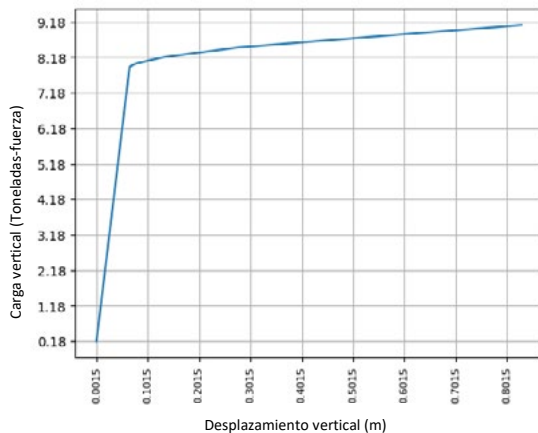


Figura 7. Gráfica fuerza-desplazamiento.

En la Figura 7 se puede observar una carga máxima de colapso de 9.18 toneladas por cada nodo de la armadura, esto debido a que la primera rótula plástica convierte de isostática a hipostática la estructura. Además, se aprecia como el desplazamiento máximo al momento del colapso está por encima de los 80 cm,

siendo este un 2.6% de lo que comprende el claro del puente.

4. Conclusiones

Mediante la aplicación de los tres algoritmos se logró obtener el perfil óptimo que cumple con las restricciones de diseño a tensión y compresión, así como minimizar el peso de toda la armadura, ya que se obtuvieron las relaciones de esfuerzo-capacidad de un 97% en la barra más crítica.

Se puede concluir que el algoritmo que necesitó el menor procesamiento de cómputo cumpliendo con las restricciones establecidas, fue el GWO, ya que con 10 individuos se lograron los mismos resultados que en los otros algoritmos, tanto PSO como FA, los cuales requirieron 50 individuos de población.

Se ha comprobado que el uso de algoritmos metaheurísticos es adecuado para la búsqueda de soluciones dentro del diseño estructural, por lo que se recomienda para futuras investigaciones el uso de secciones y geometrías más complejas que pongan a prueba la eficiencia de estos métodos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por los recursos otorgados mediante la beca para estudios de posgrado a nivel nacional. Asimismo, expresamos nuestro profundo agradecimiento a nuestra alma mater, la Universidad Autónoma de Querétaro, así como a la Facultad de Ingeniería División Posgrado, por la formación que estamos recibiendo y por considerarnos en nuestra participación en actividades de carácter científico.

Referencias

- [1] A. Klarbring y P. W. Christensen, An introduction to Structural Optimization, Linköping, Sweden: Springer, 2009.
- [2] A. e. a. Alvarado-Iniesta, «Optimización Multiobjetivo de la Estructura de una Silla utilizando un Híbrido de Redes Neuronales Artificiales y NSGA-II,» CULCyT, Cultura Científica y Tecnológica, vol. 12, n° 56, pp. 79-88, 2014.
- [3] R. e. a. Prasad, «Investigation of transmission line tower failures, » Engineering Failure Analysis, pp. 1127-1141, July 2010.
- [4] L. Grama y R. Cazacu, «Steel truss optimization using genetic algorithms and FEA, » Procedia Technology 12, pp. 339-346, 2014.
- [5] Fajardo, J., Suárez, A., Algoritmo Multigenerador de Soluciones para la competencia, La Habana, Cuba, RHO, Edición N° 1, 2010.
- [6] Suárez, A., «Una solución flexible y eficiente para el trazado de grafos basada en el escalador de colinas estocástico. En CEIS. 2000». La Habana: Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría», CUJAE, 2000.
- [7] Vargas-Pardo, L.F. y Giraldo-Ramos, F.N. (2022). Fireflies algorithm for Facility Layout Optimization. Tecnura, 26(74), 35-48. <https://doi.org/10.14483/22487638.17731>
- [8] Yang, X. S. (2013). Multi-objective fireflies algorithm for continuous optimization. Engineering with Computers, 29(2), 175-184. <https://doi.org/10.1007/s00366-012-0254-1>
- [9] Kennedy, J., Eberhart, R.: Particle Swarm Optimization. Purdue School of Engineering and Technology Indianapolis, 1995.
- [10] Vargas-Pardo, L.F. y Giraldo-Ramos, F.N. (2022). Fireflies algorithm for Facility Layout Optimization. Tecnura, 26(74), 35-48. <https://doi.org/10.14483/22487638.17731>
- [11] Dodge Velázquez Charles F y Lavalle Mejía M, Análisis del algoritmo de optimización por enjambre de partículas por medio de una aplicación gráfica 3D, Research in Computing Science 116, pp. 135–140; 2016.
- [12] Benítez Randy Alonso Benítez, DelgadoJairo Rojas, Implementación del algoritmo meta-heurístico Gray Wolf Optimization para la optimización de funciones objetivo estándar, Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas, Vol. 13, No. 8, Mes Agosto, Pág. 174-194, 2020
- [13] Mirjalili, S; Lewis, A, GreyWolf algorithm. Advances in engineering software, 2014, vol. 69, p. 46-61.
- [14] Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2001). "A Modal Pushover Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings."
- [15] Applied Technology Council (ATC), 1996. "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings."
- [16] Yang, X.-S. (2010). Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. United Kingdom: Luniver Press.

“Optimización del sistema semafórico para reducir el tráfico vehicular mediante un microsimulador”

“Optimization of the Traffic Signal System to Reduce Vehicular Traffic Using a Microsimulator”

Carrasco Morales Julio Cesar

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

Ing.juliocesarcsm@outlook.es

Palabras clave: VTM, ciclo semafórico, optimización, simulación, tráfico vehicular.

Resumen- Optimizar los ciclos semafóricos en un corredor vial, para reducir las colas vehiculares y los tiempos de recorrido. Con la utilización del software GRIDSMAST, de la secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro, se obtuvo información histórica de 7 intersecciones consecutivas de un corredor vial y reflejándola en un microsimulador, logrando optimizar los ciclos semafóricos, consiguiendo hacer una comparativa del antes y después de las colas vehiculares y reduciendo los tiempos de viaje hasta en un 37%. Con esto, se pretende dar un panorama nuevo de posibilidades para la disminución de tráfico vehicular al municipio, aprovechando al máximo las herramientas que ya tienen disponibles.

Keywords: VTM, traffic light cycle, optimization, simulation, vehicular traffic

Abstract- Optimizing traffic signal cycles in a roadway corridor to reduce vehicular queues and travel times. Using the GRIDSMAST software from the Secretariat of Mobility of the Municipality of Querétaro, historical data from 7 consecutive intersections along a roadway corridor was collected and simulated in a microsimulator. This allowed for the optimization of traffic signal cycles, resulting in a comparison of vehicular queues before and after the optimization and reducing travel times by up to 37%. This aims to provide the municipality with a new perspective on possibilities for reducing vehicular traffic, making the most of the tools they already have available.

1. Introducción

Los investigadores en transporte, han propuesto varias soluciones para resolver el problema del congestionamiento vehicular: la promoción del transporte público, el desarrollo de infraestructura de transporte sostenible, la implementación de sistemas de peaje y la promoción de programas de vehículos compartidos (carpooling). Sin embargo, estas soluciones no son una solución única y deben

ser implementadas de manera combinada para obtener resultados efectivos [1].

Por lo que es necesario desarrollar otro tipo de estrategias para controlar o al menos reducir los problemas asociados al tráfico vehicular, ya que, día a día grandes ciudades del mundo registran mayores cantidades de vehículos de motor y por consecuencia, mayores volúmenes de tráfico [2].

Algunos investigadores han propuesto que la solución al problema del congestionamiento

vehicular se puede obtener mediante una óptima programación de los semáforos que llevaría a mejorar el flujo vehicular [3].

Pero, la óptima configuración de los semáforos, es uno de los grandes problemas de las ciudades, estos juegan un papel importante en la gestión del tráfico, pero, el sistema de semáforos existente en la mayor parte de zonas semaforizadas no logra hacer frente al aumento de los requerimientos de tránsito vehicular debido a la programación horaria fija o manual [4].

En la ciudad de Querétaro es la séptima ciudad a nivel nacional con más tráfico vehicular, de acuerdo con la plataforma “Waze”; quien reportó en el año 2022 niveles de movilidad mayores a los registrados en años prepandemia [5].

El funcionamiento del sistema semafórico en la mayor parte de los corredores viales consiste en el monitoreo de las intersecciones desde el centro de control, el cual se ve reflejado en un mapa de la ciudad, y cuando una vialidad presenta inicios de congestión vehicular se encienden puntos rojos y la optimización del tiempo semafórico se da de forma manual, en donde se aumenta o disminuye el tiempo de las fases semafóricas según sea el caso. Además, es muy común ver los semáforos de diferentes intersecciones por toda la ciudad en ámbar y un oficial de movilidad es quien hace el control de paso vehicular en la intersección para de esta manera optimizar el flujo vehicular y dar preferencia a las vías congestionadas.

Algunos de los principales objetivos de Municipio de Querétaro planteados en su Plan Municipal de Desarrollo del Municipio de Querétaro 2021-2024, es mejorar la movilidad y ayudar al medio ambiente. [6].

Por esta razón, esta investigación se centra en utilizar herramientas disponibles, como lo son aforos vehiculares y un simulador de libre acceso, y explotarlas para generar un beneficio al disminuir el problema de tráfico vehicular en la ciudad de Querétaro.

2.- Metodología

Para lograr el objetivo de optimizar los ciclos semafóricos de un corredor vial para reducir las colas vehiculares y los tiempos de viaje proceso metodológico consiste en varios pasos, desde la recolección de información, su procesamiento y hasta la simulación en un software.

2.1 Recolección de Información

Se obtuvo información del volumen y movimientos del tráfico vehicular en el corredor vial de Pie de la Cuesta de la ciudad. Esta información fue proporcionada por la Secretaria de Movilidad del Municipio de Querétaro (SEMOV) mediante el software GRIDSMART, el cual consiste en un conjunto de cámaras colocadas en diferentes parte de la ciudad que además de ayudar con el monitoreo, pueden registrar la cantidad de vehículos que pasan por las intersecciones, su velocidad, giros y la composición vehicular. Los datos recabados fueron de 7 intersecciones como se muestra en la Fig 1.



Figura 1. Mapa de la zona de estudio. Fuente: Open Streetmaps.

La información descargada fue de 4 meses (agosto-noviembre) del año 2022, en aforos a cada 15 minutos. Se eligió este periodo ya que aquí se encuentra un flujo vehicular normal, es decir, sin periodo vacacional o días no laborables. La descarga de los datos de movimientos de los vehículos fue para hacer la matriz origen-destino la cual es necesaria para la simulación. También, se descargaron datos de velocidad y de composición vehicular, para hacer la simulación lo más real posible.

2.2 Importación de mapas

Para importar el mapa del corredor vial Pie de la Cuesta al simulador “Simulation of Urban Mobility” (SUMO), que es el simulador elegido para este trabajo ya que es de libre acceso y además de ser el más estudiado por la bibliografía para investigaciones semejantes, se ocupó de su misma paquetería la herramienta “OSM web wizard”, que es un software con mapas de la aplicación “Open StreepMaps”, se eligió la zona y se importó al editor del simulador llamado “Netedit”.

2.3 Matriz Origen-Destino

Ya con los aforos necesarios se procedió a realizar la matriz origen-destino (O-D). Esta matriz O-D es necesaria para saber la cantidad de vehículos que pasan por una intersección y hacia donde se dirigen, y con esto determinar los tiempos necesarios de las duraciones de los ciclos semafóricos. Para esto se realizó un análisis a la información descargada para encontrar la hora de máxima demanda en el día de máxima demanda de los 4 meses con información obtenida. El análisis arrojó que el día de máxima demanda fue el 21 de octubre del año 2022, de las 7:15am a las 8:15 am. Después, se ingresaron los datos correspondientes al editor Netedit, donde se ingresó la cantidad de vehículos que transitan por cada intersección y las direcciones que toman.

2.4 Medición de ciclos semafóricos actuales

Se acudió personalmente a la zona a medir los ciclos semafóricos actuales (5 de junio del 2024) para cada intersección en el horario de la Hora de Máxima Demanda (HMD), ya anteriormente mencionado. Esto con el fin de saber las condiciones de tráfico presentes con los ciclos semafóricos actuales y hacer una comparativa con la optimización de los mismos.

2.5 Simulación

Para la simulación en el editor Netedit se dieron las características necesarias para hacer una simulación lo más real posible. Para la velocidad se tomó una media de las velocidades medidas en la HMD, siendo 45 km/h el valor obtenido. También, se ingresaron las composiciones vehiculares de los vehículos, siendo motocicletas, automóviles, camiones y autobuses correspondientemente. Se agregaron los tiempos semafóricos medidos correspondiente a cada intersección y se procedió a medir las colas vehiculares y los tiempos de recorrido.

2.6 Optimización semafórica

Para la optimización semafórica, reducción de colas vehiculares y tiempos de viaje, se propusieron diferentes tiempos semafóricos, procediendo a medir las colas vehiculares y tiempos de recorrido de cada propuesta y registrarlos. Estos tiempos se fueron proponiendo buscando la coordinación entre intersecciones antes que la duración de los ciclos semafóricos, disminuyendo o aumentando el tiempo minuciosamente para encontrar la mejor alternativa de optimización.

3.- Resultados y discusión

Los primeros resultados fueron los aforos vehiculares, antes ya mencionados, de las 7 intersecciones que componen el corredor vial. La Tabla 1 es tan solo una muestra de la

información, la primera columna contiene la fecha y hora en periodos de 15 minutos, las siguientes 4 columnas es el número de vehículos por clasificación vehicular que pasaron por la intersección en ese periodo, siendo, las columnas 2,3,4 y 5, motocicletas, automóviles, camiones y autobuses respectivamente.

Tabla 1. Muestra de los aforos descargados del software GRIDSMArt. Fuente: SEMOV.

Fecha	0-2.7m	3-7m	7.3-10.7m	11-15.5m
01082022T00:00:00:00	0	47	0	0
01082022T00:15:00:00	0	47	0	0
01082022T00:30:00:00	0	46	0	0
01082022T00:45:00:00	0	27	0	0
01082022T01:00:00:00	0	33	0	0
01082022T01:15:00:00	0	32	0	0
01082022T01:30:00:00	0	24	0	0

Otra parte de los resultados es la Figura 2, que muestra el mapa importado al simulador SUMO del corredor vial Pie de la Cuesta.

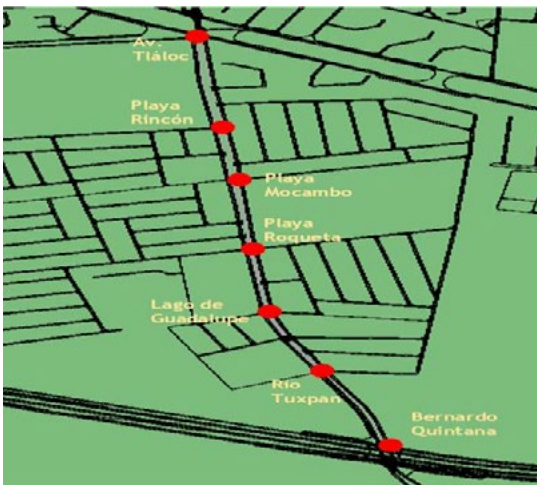


Figura 2. Mapa del corredor vial Pie de la Cuesta dentro del simulador SUMO. Fuente: Propia.

Como continuación del apartado de resultados, la Tabla 2 muestra los tiempos de verde medidos “in situ” para cada intersección, aclarando que el tiempo de ámbar es de 2 segundos para todas las intersecciones. La parte donde no se muestra un valor es porque en ese sentido no está ubicado un semáforo.

Tabla 2. Tiempos de verde medidos “in situ” el día 5 de junio del 2024 en la HMD. Fuente: Propia.

Intersección	Sentido			
	Norte Verde	Sur Verde	Este Verde	Oeste Verde
Bernardo Quintana	37 seg	37 seg	-	-
Río Tuxpan	37 seg	37 seg	25 seg	25 seg
Lago de Guadalupe	37 seg	37 seg	27 seg	-
Playa Roqueta	37 seg	37 seg	25 seg	25 seg
Playa Mocambo	37 seg	37 seg	-	25 seg
Playa Rincón	37 seg	37 seg	-	25 seg
Av. Tlalóc	37 seg	37 seg	30 seg	30 seg

Tras realizar las diferentes simulaciones en donde se plantearon diferentes tiempos de los ciclos semafóricos, se realizó un análisis para saber el tiempo optimo con el que se disminuyan las colas vehiculares y se reduzcan los tiempos de viaje.

3.1 Colas vehiculares

Se hicieron 10 propuestas de tiempos de ciclo semafórico para cada intersección, la Tabla 3a muestra los resultados de medición de colas vehiculares en la intersección Pie de la Cuesta con Bernardo Quintana, en el sentido de Norte a Sur y para las propuestas 1 a 4. La Tabla 3b muestra los resultados de las mediciones de colas vehiculares de las propuestas 5 a 10.

La columna 2 denominada “Medidos”, muestra las colas vehiculares de los semáforos medidos en campo, de ahí se desglosan las diferentes propuestas, donde se disminuyó o aumento el tiempo de verde y al igual se fueron midiendo la cantidad de vehículos en espera, siendo la propuesta 10 la que muestra una mayor reducción. La flecha indica el sentido de circulación, siendo la letra “N” el norte.

La gráfica 3 muestra los resultados de las tablas 3a y 3b, para ayudar al entendimiento de resultados. Se aprecia claramente como la propuesta 10 tiene ventaja contra las demás.

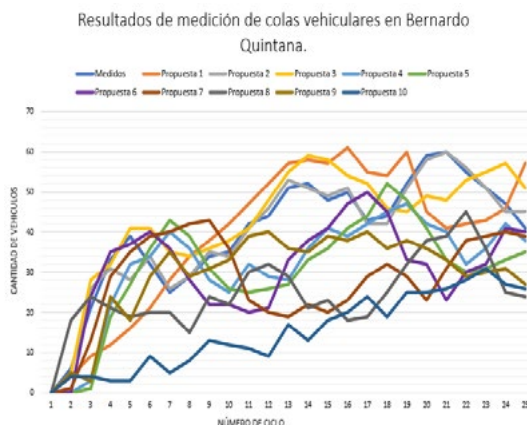
Tabla 3a. Resultados de medición de colas vehiculares en Bernardo Quintana. Fuente: Propia

N No. de Ciclo	Medidos Bernardo Quintana Tiempo de verde= 37 seg vehicular (veh)	Propuesta 1 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 30 seg vehicular (veh)	Propuesta 2 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 33 seg vehicular (veh)	Propuesta 3 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 40 seg vehicular (veh)	Propuesta 4 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 45 seg vehicular (veh)
1	0	0	0	0	0
2	6	4	5	5	0
3	21	9	26	28	3
4	33	12	31	32	22
5	39	16	28	41	32
6	32	21	34	41	34
7	25	28	26	35	40
8	29	34	29	34	36
9	34	38	35	36	28
10	35	42	34	38	25
11	42	47	41	41	32
12	44	52	46	48	29
13	51	57	53	55	28
14	52	58	51	59	36
15	48	57	49	58	41
16	50	61	51	54	39
17	43	55	42	52	42
18	44	54	42	46	45
19	52	60	51	45	47
20	59	45	58	49	42
21	60	41	60	48	40
22	55	42	56	53	32
23	51	43	51	55	36
24	47	46	45	57	42
25	41	57	45	51	38

Tabla 3b. Continuación de resultados de medición de colas vehiculares en Bernardo Quintana. Fuente: Propia.

Propuesta 5 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 50 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 6 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 53 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 7 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 55 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 8 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 57 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 9 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 55 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 10 Bernardo Quintana Norte Tiempo de verde= 57 seg Cola vehicular (veh)
0	0	0	0	0	0
1	24	13	24	3	4
19	35	29	21	24	3
27	37	35	19	18	3
36	40	39	20	29	9
43	36	40	20	35	5
39	28	42	15	29	8
31	22	43	24	31	13
26	22	36	22	33	12
25	20	23	30	39	11
26	21	20	32	40	9
27	33	19	29	36	17
33	38	22	21	35	13
36	41	20	23	39	18
41	47	23	18	38	20
44	50	29	19	40	24
52	45	32	25	36	19
48	33	29	32	38	25
41	32	23	38	36	25
33	23	31	39	33	26
30	30	38	45	29	28
31	32	39	36	30	31
33	41	40	25	31	27
35	40	39	24	27	26

Gráfica 3. Resultados de medición de colas vehiculares en Bernardo Quintana. Fuente: Propia.



Las Tablas 4a y 4b muestran los resultados de las mediciones en la intersección de Av. Pie de la Cuesta con Lago de Guadalupe en el sentido Norte a Sur. Aquí no hay diferencia significativa en la cantidad de vehículos en espera entre las distintas propuestas, pero se consideraron los tiempos de viaje para medir los cambios. Y, al igual que los resultados anteriores, en la gráfica 4 se representan los resultados de la tabla 4a y 4b, observando que no hay una clara ventaja entre algunas propuestas para esta intersección.

Tabla 4a. Resultados de medición de colas vehiculares en L. de Guadalupe. Fuente: Propia

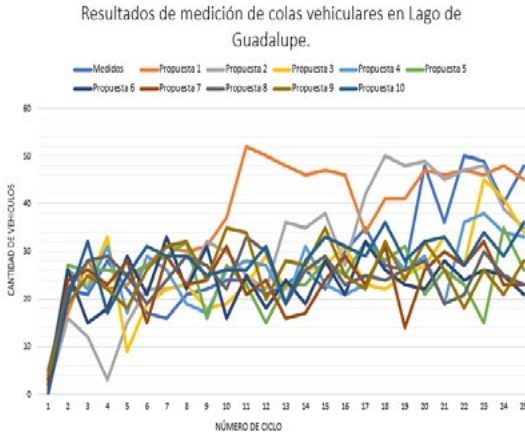
N No. de Ciclo	Medidos Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 37 seg Cola vehicular	Propuesta 1 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 30 seg Cola vehicular	Propuesta 2 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 33 seg Cola vehicular	Propuesta 3 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 43 seg Cola vehicular	Propuesta 4 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 45 seg Cola vehicular
1	1	1	1	2	2
2	22	17	16	26	2
3	21	28	12	23	22
4	28	22	3	33	31
5	22	23	15	9	17
6	17	27	22	19	29
7	16	31	22	22	26
8	21	30	23	23	19
9	22	31	32	18	17
10	24	37	30	19	26
11	24	52	25	23	28
12	21	50	22	29	27
13	23	48	36	22	19
14	26	46	35	26	31
15	22	47	38	27	23
16	30	46	27	31	21
17	35	34	42	23	23
18	27	41	50	22	31
19	26	41	48	25	26
20	48	47	49	27	29
21	36	46	45	33	19
22	50	47	47	27	36
23	49	46	48	45	38
24	40	48	39	41	34
25	48	45	35	34	33

Tabla 4b. Continuación de resultados de medición de colas vehiculares en L. de Guadalupe. Fuente: Propia

Propuesta 5 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 47 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 6 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 50 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 7 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 50 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 8 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 50 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 9 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 46 seg Cola vehicular (veh)	Propuesta 10 Lago de Guadalupe Norte Tiempo de verde= 45 seg Cola vehicular (veh)
2	3	2	5	4	0
27	26	24	22	19	20
26	15	26	28	25	32
26	18	23	29	22	17
25	29	28	25	18	25
27	21	15	19	26	31
29	33	29	24	31	29
32	22	23	29	32	29
16	31	24	27	24	25
27	16	31	22	35	26
23	25	21	33	34	26
15	18	24	30	20	31
23	24	16	19	28	19
23	19	17	26	27	28
28	28	24	29	35	33
25	21	29	23	25	31
32	32	23	25	22	29
28	26	31	24	32	36
31	23	14	26	24	28
21	22	26	28	32	32
26	28	30	19	26	33
23	24	27	21	18	27
15	26	32	30	26	34
35	25	23	25	21	29
26	21	23	23	28	36

Y las Tablas 5a y 5b muestran los resultados ahora en el sentido contrario, es decir de Sur a

Gráfica 4. Resultados de medición de colas vehiculares en L. de Guadalupe. Fuente: Propia



Norte en la intersección de Av. Pie de la Cuesta-Playa Roqueta. Aquí de igual forma no hay una gran variación en la cantidad de vehículos en espera de una propuesta a otra, sin embargo, el tiempo de verde propuesto en este sentido tiene influencia en las otras direcciones y en los resultados de las tablas 2 y 3 y viceversa. Los resultados de las tablas 5a y 5b también se ven reflejados en la gráfica 5 como complemento.

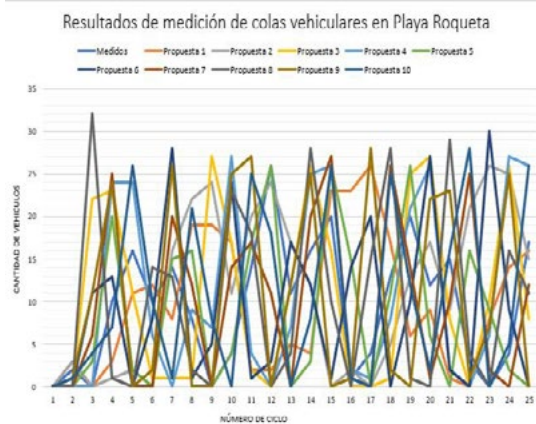
Tabla 5a. Resultados de medición de colas vehiculares en P. Roqueta. Fuente: Propia

N ↑ No. de Ciclo	Medidos Playa Roqueta Sur	Propuesta 1 Playa Roqueta Sur	Propuesta 2 Playa Roqueta Sur	Propuesta 3 Playa Roqueta Sur	Propuesta 4 Playa Roqueta Sur
	Tiempo de verde= 37 seg	Tiempo de verde= 30 seg	Tiempo de verde= 33 seg	Tiempo de verde= 40 seg	Tiempo de verde= 42 seg
	Cola vehicular	Cola vehicular	Cola vehicular	Cola vehicular	Cola vehicular
1	0	0	0	0	0
2	2	3	3	0	0
3	0	0	0	22	0
4	10	3	1	23	24
5	16	11	2	11	24
6	10	12	0	1	6
7	14	8	16	1	0
8	8	19	22	1	9
9	0	19	24	27	7
10	4	17	11	17	27
11	14	2	20	2	4
12	26	2	24	0	0
13	11	5	17	12	7
14	16	4	12	26	25
15	20	23	0	16	26
16	1	23	2	0	2
17	4	26	0	0	1
18	13	17	5	1	8
19	20	6	13	25	21
20	12	9	17	27	26
21	15	1	9	8	2
22	3	0	21	0	0
23	0	8	26	10	6
24	4	14	25	26	27
25	17	16	15	8	26

Tabla 5b. Continuación de resultados de medición de colas vehiculares en P. Roqueta. Fuente: Propia

Propuesta 5 Playa Roqueta Sur	Propuesta 6 Playa Roqueta Sur	Propuesta 7 Playa Roqueta Sur	Propuesta 8 Playa Roqueta Sur	Propuesta 9 Playa Roqueta Sur	Propuesta 10 Playa Roqueta Sur
Tiempo de verde= 40 seg	Tiempo de verde= 38 seg	Tiempo de verde= 40 seg	Tiempo de verde= 45 seg	Tiempo de verde= 42 seg	Tiempo de verde= 41 seg
Cola vehicular (veh)	Cola vehicular (veh)	Cola vehicular (veh)	Cola vehicular (veh)	Cola vehicular (veh)	Cola vehicular (veh)
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1
3	11	6	32	11	4
20	13	25	1	24	7
2	0	0	0	0	26
0	8	0	14	2	10
15	28	20	13	26	1
16	1	12	2	0	21
0	5	0	0	0	0
4	24	14	23	25	0
17	1	17	18	27	25
26	3	11	0	0	18
0	17	0	4	12	0
3	12	20	28	25	8
26	1	27	10	0	26
15	14	1	0	1	1
0	20	0	15	28	0
11	0	26	28	2	25
26	10	14	1	0	12
6	27	1	0	22	2
0	2	10	29	23	16
16	0	25	4	1	28
9	30	2	0	7	0
2	9	0	16	25	5
0	0	12	11	0	26

Gráfica 5. Resultados de medición de colas vehiculares en P. Roqueta. Fuente: Propia



3.2 Tiempos de recorrido

Se tomaron 10 autos y se midió el tiempo de recorrido durante todo el corredor vial del mismo vehículo para las diferentes propuestas y se sacó un promedio para saber con qué propuesta se optimizan de mejor manera los ciclos semafóricos.

Las tablas 6a y 6b muestran los vehículos en el recorrido de Norte a Sur, partiendo desde Av. Tlaloc hasta terminar en Bernardo Quintana. Siendo las propuestas 6 y 10 las que tienen una mejor reducción de tiempo de recorrido, de más de dos minutos de optimización.

Tabla 6a. Resultados de medición de tiempos de recorrido norte-sur. Fuente: Propia

Tiempos de Recorrido (min)						
No. Auto	Medido	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4	Propuesta 5
Auto 17.57	05:04	04:30	07:12	05:10	03:34	04:03
Auto 17.134	05:44	06:15	7:14	04:16	04:45	03:05
Auto 17.178	06:01	04:40	09:20	05:40	03:48	05:08
Auto 17.267	04:58	07:58	10:46	05:35	05:18	04:33
Auto 17.387	07:12	11:30	14:30	06:01	04:15	04:28
Auto 17.445	07:24	13:45	11:30	05:47	03:57	05:21
Auto 17.532	05:54	09:05	14:20	08:01	04:40	05:23
Auto 17.599	08:55	10:50	11:12	07:14	05:41	04:28
Auto 17.655	09:40	18:35	14:15	09:30	04:13	05:38
Auto 17.714	07:22	16:10	13:45	09:27	05:10	05:24
Promedio	06:39	10:18	11:07	06:23	04:35	04:44

Tabla 6b. Continuación de resultados de medición de tiempos de recorrido norte-sur. Fuente: Propia

corrido (min)						N
Propuesta 5	Propuesta 6	Propuesta 7	Propuesta 8	Propuesta 9	Propuesta 10	
04:03	04:08	00:59	03:48	03:51	04:02	
03:05	03:05	03:47	04:34	03:43	03:11	
05:08	03:45	03:50	05:02	04:06	03:48	
04:33	03:05	04:21	04:36	04:23	04:39	
04:28	04:06	04:34	04:32	05:08	04:28	
05:21	05:18	03:59	05:15	05:31	05:06	
05:23	05:20	05:08	05:21	04:54	04:45	
04:28	04:17	04:19	05:56	04:12	04:17	
05:38	05:21	05:35	05:20	05:40	04:12	
05:24	05:16	05:40	03:34	05:07	05:05	
04:44	04:22	04:37	04:46	04:36	04:20	

Las Tablas 7a y 7b muestran el tiempo de los vehículos en el recorrido de sur a norte, al contrario de la tabla 5. Aquí la variación de tiempos de recorrido no es tan significativa, y esto se debe a que es la mitad de flujo vehicular que, en el sentido contrario, por lo que no se genera tanto tráfico vehicular y no se aprecia un óptimo.

Tabla 7a. Resultados de medición de tiempos de recorrido sur-norte. Fuente: Propia

Tiempos de Recorrido (min)						
No. Auto	Medido	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4	Propuesta 5
Auto 1.62	02:33	02:45	03:14	02:18	02:40	04:16
Auto 1.113	03:35	04:47	04:23	03:30	08:24	04:28
Auto 1.162	03:03	02:36	03:50	02:54	03:50	05:00
Auto 1.199	04:10	02:24	04:22	03:53	03:52	03:14
Auto 1.243	02:04	04:21	03:01	02:15	03:17	04:08
Auto 1.313	04:08	03:04	04:36	04:17	03:07	03:10
Auto 1.351	04:39	04:40	04:18	04:40	02:56	03:40
Auto 1.418	03:08	02:30	03:35	02:27	04:05	03:38
Auto 1.571	03:34	03:03	04:52	03:46	02:48	04:14
Auto 1.622	03:29	04:16	03:49	03:17	03:44	03:44
Promedio	03:26	03:28	03:59	03:20	03:21	03:56

Tabla 7b. Continuación de resultados de medición de tiempos de recorrido sur-norte. Fuente: Propia

corrido (min)						N
Propuesta 5	Propuesta 6	Propuesta 7	Propuesta 8	Propuesta 9	Propuesta 10	
04:16	04:10	04:08	03:50	03:48	04:04	
04:28	04:08	04:10	03:31	03:47	04:12	
05:00	04:45	04:51	03:08	03:06	03:46	
03:14	03:15	04:10	04:10	03:22	03:32	
04:08	03:42	03:42	03:45	03:44	03:25	
03:10	03:17	03:13	03:16	03:11	02:59	
03:40	03:40	03:36	03:30	03:38	03:31	
03:38	03:20	03:24	03:16	03:43	02:29	
04:14	03:18	03:47	04:05	03:11	02:20	
03:44	03:44	03:48	03:46	03:42	02:57	
03:56	03:37	03:45	03:33	03:31	03:15	

Con ayuda del promedio de los 10 vehículos de la columna “medios”, siendo 6 minutos y 39 segundos, que es igual a 399 segundos y correspondiendo al 100%, y con el tiempo promedio de la mejor propuesta, siendo la propuesta 10 teniendo un tiempo promedio de 4 minutos y 20 segundos, que es igual a 260 segundos, se obtuvo el porcentaje de mejora en la reducción de tiempos, realizando la siguiente expresión matemática (1):

$$\frac{A \rightarrow B}{C \rightarrow X} = \frac{399\text{seg} \rightarrow 100\%}{260\text{seg} \rightarrow X} \quad (1)$$

$$\therefore X = \frac{260\text{seg} * 100\%}{399\text{seg}} = 34.8\%$$

Teniendo hasta un 34.8% de reducción de tiempos de recorrido con este muestreo.

3.- Conclusiones

Los resultados de esta investigación mostraron una reducción de hasta un 34.8% en los tiempos de viaje de los vehículos, en el corredor vial de Pie de la Cuesta.

La reducción de colas vehiculares no tuvo un impacto significativo durante los escenarios de optimización, ya que, mientras en una intersección disminuye, la siguiente, aumenta.

No necesariamente el que se disminuyan las colas vehiculares en alguna intersección

significa que disminuyan los tiempos de viaje. La tabla 3b muestra un mayor número de vehículos del ciclo 12 al 20 en la propuesta 6 en comparación con la propuesta 7, pero en los tiempos de viaje la propuesta 6 tiene menor tiempo de viaje.

El tiempo optimo local para una intersección, puede no contribuir al optimo global de todo el corredor, para reducir el tiempo de recorrido. Comparando en la tabla 4b, en la mayoría de ciclos medidos el tiempo de 50 segundos para la propuesta 6 reduce más las colas vehiculares que en la propuesta 10 y los 45 segundos dados ahí, siendo el óptimo para ese sentido el tiempo de 50 segundos, pero en los tiempos de viaje la propuesta 10, con los 45 segundos, tiene mejor reducción de tiempo que la propuesta 6.

Se corroboró que para una buena optimización semafórica es más importante la coordinación entre todos los semáforos que componen el corredor vial antes que un tiempo de verde prolongado, así como lo menciona Aldape Cantú [6] en su libro “Los semáforos y el control dinámico del tránsito”.

Montiel Rodríguez en su investigación redujo los tiempos de recorrido un 36% con su método de vehículo flotante, aplicado en el municipio de Santiago de Querétaro, Querétaro, México [8]; esta investigación con el método correspondiente redujo hasta un 34.8% los tiempos de viaje aplicándolo en un corredor vial del mismo municipio.

Visualmente se observó en la simulación, que el ciclo semafórico de una intersección puede llegar a afectar la cantidad de vehículos en espera en las intersecciones consecuentes, ya que entre más vehículos se permitan pasar en una intersección, estos tendrán que esperar en la siguiente, si no hay una correcta coordinación.

Agradecimientos

Agradecer a la Universidad Autónoma de Querétaro, y en especial a la Facultad de

Ingeniería, por brindarme los conocimientos necesarios durante mi estancia en la misma.

A Conahcyt por el apoyo económico durante esta investigación.

Agradecer también a la SEMOV por brindarme la información necesaria para poder llevar a cabo este artículo.

Referencias

- [1] Yu-hui, G., Tang, Z., & Jie, G. (2020). Could a smart city ameliorate urban traffic congestion? a quasi-natural experiment based on a smart city pilot program in china. *Sustainability*, 12(6), 2291. <https://doi.org/10.3390/su12062291>.
- [2] García-Nieto, J., Olivera, A., & Alba, E. (2013). Optimal cycle program of traffic lights with particle swarm optimization. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, 17(6), 823-839. <https://doi.org/10.1109/tevc.2013.226075>.
- [3] Wong, C. and Heydecker, B. (2009). Adaptive traffic signal control using approximate dynamic programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(5), 456-474. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.04.005>.
- [4] Al-qutwani, M., & Wang, X. (2019). Smart traffic lights over vehicular named data networking. *Information (Switzerland)*, 10(3).
- [5] TomTom. (2021). TomTom Traffic Index. Ranking 2021. Recuperado de <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/?country=MX>. Consultado en enero de 2023.
- [6] H. Ayuntamiento de Querétaro, “Plan Municipal de Desarrollo 2021-2024”, págs. 20-32, 2022.
- [7] Aldape Cantú, R. (1976). Los Semáforos y el control dinámico del tránsito. México: Representaciones y Servicios de Ingeniería.
- [8] Rodríguez, S. L. M. (2021). Optimización de un sistema de semáforos mediante simulación empleando un vehículo flotante. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/3443>.

Análisis de redes semánticas naturales en la virtualidad: Tendencias de búsqueda referentes a la arquitectura

Semantic Network Analysis in the Virtuality: Search Trends related to Architecture

Cruz Ríos Karen de los Angeles, Flores Gutiérrez Avatar
Maestría en Arquitectura, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
kcruz30@alumnos.uaq.mx, avatar.flores@uaq.mx

Palabras clave: ARQ, Redes semánticas, Tendencias Arquitectónicas, Interpretación semántica,

Resumen

En la era de la digitalización, la arquitectura se ve influenciada por las corrientes globales que emergen en las plataformas en línea convirtiéndose en el lugar en el que podemos visualizar con mayor claridad los cambios en la sociedad. Este artículo presenta un análisis de tendencias de búsquedas, mediante la recopilación y análisis de datos referentes a la arquitectura provenientes de Google. Utilizando técnicas de análisis de redes semánticas, se identifican, categorizan e interpretan patrones de búsqueda, que proporcionan una visión actualizada de la perspectiva de la arquitectura en México. El estudio destaca como la integración de datos de las plataformas mencionadas enriquece el entendimiento de las dinámicas del sector, facilitando la detección de preferencias, inquietudes y aspiraciones de los usuarios en línea permitiendo una mejor comprensión de los intereses de los posibles clientes/usuarios.

Keywords: ARQ, Semantic network, Architectural Trends, Semantic Interpretation

Abstract-

In the era of digitalization, architecture is influenced by the global trends that emerge on online platforms, making it the place where we can most clearly visualize changes in society. This article details the analysis of search trends by collecting and analyzing architecture-related data from Google. Using semantic network analysis techniques, search patterns are identified, categorized and interpreted, providing an updated view of the perspective of architecture in Mexico. The study points out how the integration of data from the mentioned platforms enriches the understanding of the dynamics of the sector, facilitating the detection of preferences, concerns and aspirations of online users, allowing a better understanding of the interests of potential clients/users.

1. Introducción

La gran extensión del uso de Internet como medio de comunicación ha modificado en gran medida la dinámica en el que las personas interactúan entre sí, y obtienen información con diversos fines. En México al año 2022, existen aproximadamente 93.1 millones de usuarios con acceso a Internet lo que representa el 78.6% de la población total según datos del INEGI [1].

Las diversas comunidades existentes en la red, se convierten en potenciales y ricas fuentes de información, la gran cantidad de contenido producido y su consumo ha hecho que su relevancia sea relevante a la construcción del contexto actual, y en todas las disciplinas.

En el caso de la disciplina de la arquitectura ha permitido un intercambio continuo de ideas, creando un espacio en el que las personas comparten tradiciones y prácticas desde diversos entornos globales, enriqueciendo de esta manera las obras, transformando la forma en la que los espacios son concebidos y construidos. Este intercambio de información no solo ha tenido grandes ventajas, sino también ha tenido algunas desventajas que deben ser consideradas, como la homogeneización cultural, que ha provocado que localidades y territorios sufran de una pérdida de identidad local, así como de técnicas de construcción a causa de la similitud entre diseños. Es importante hacer un análisis del contexto actual ya que nos permitirá comprender mejor la perspectiva contemporánea que se tiene de la disciplina.

Examinar las tendencias de búsqueda, nos permite acercarnos al fenómeno de la percepción de la arquitectura, además de permitir establecer fundamentos teóricos respecto a este. Mediante el objeto de estudio

se crea una retroalimentación que dará coherencia y lógica a los resultados adquiridos, que ayudara a enriquecer las dimensiones del fenómeno [2].

Una manera de entenderlo es a través de la técnica de Redes Semánticas Naturales.

El concepto de redes semánticas fue utilizado inicialmente por R. Quillian [3], para explicar cómo se organiza el significado y asociaciones de las palabras en la estructura de la memoria individual y generar una simulación computacional emulando el proceso mental de adquisición de lenguaje en relación a la significación de conceptos. Este primer acercamiento sienta las bases para el desarrollo de la Inteligencia Artificial.

Las redes semánticas naturales (RSN) son una técnica híbrida de investigación cuantitativa-cualitativa, y son una aproximación al estudio del significado donde se obtienen resultados naturales¹[2], donde se combina la asignación de establecer medidas, e interpretar los resultados encontrados.

Los significados que las personas dotan a los conceptos son dinámicos, se transforman cuando el contexto cambia, se enriquecen y evolucionan en las mentes de las personas, sin embargo, este cambio se da con cierta estabilidad al viajar en forma de comunicación. El significado no solo permite comunicarnos, sino que impacta de forma directa sobre la conducta de los individuos y da dirección a las acciones provocadas por el estímulo que este representa [4].

La técnica RSN se considera la forma interna de organización de información en la memoria de corto plazo como una red que vincula las palabras y eventos a significados, de modo que cuando se ve en la necesidad de significar la información, se construye a partir de experiencias vividas [5]. Además, no todos los

¹ Por naturales se refiere a que se evita la utilización de taxonomías artificiales creadas por los investigadores

significados tienen el mismo peso dentro de la red, siendo medible la distancia entre conceptos [5]. Sobre esta distancia es importante mencionar la divergencia y recurrencia semántica.

La sinonimia es recurrente en las RSN, su repetición es solo parcial o aproximada en su significado, lo que quiere decir que las palabras pueden ser sustituidas en el léxico bajo ciertas condiciones contextuales, si intercambiamos los significados de la palabra elegida con un sinónimo cercano y repetimos el proceso varias veces en cadena, con el sinónimo resultante, nos encontraremos que la palabra final no concuerda con el sinónimo inicial, a esto se le llama desplazamiento de significado o divergencia de semántica [6].

2. Cuerpo Metodológico

Los objetivos planteados a desarrollar esta investigación son:

- A partir de búsquedas realizadas en el buscador de Google, identificar redes de vocabulario usado y sus participantes.
- Establecer una metodología que permita identificar patrones y tendencias vinculadas a la búsqueda relacionada con la arquitectura en sitios web.

Para este estudio, las RSN sirven para traducir patrones de búsquedas en la red respecto a la arquitectura y vivienda. La técnica se realiza desde un enfoque únicamente cualitativo, donde se privilegia el carácter interpretativo de los datos. El principal objetivo de la utilización de esta técnica es realizar una aproximación inicial a la percepción social a través de una ventana “Internet” que permita la interpretación jerárquica de la información mostrada a nivel de memoria semántica registrada.

Este estudio tiene un diseño exploratorio de corte cualitativo, en el que para realizar los objetivos planteados se usó la técnica de análisis RSN adaptada a la virtualidad. Se analizaron algunas de las redes generadas por patrones de búsqueda en México sobre la arquitectura, en este artículo se presentan dos búsquedas ejemplo. Visualizar las redes que surgen a partir de la búsqueda de las palabras ayuda a hacer conexiones de significados que la sociedad tiene respecto a la arquitectura.

La técnica RSN consiste en proporcionar una *palabra estímulo* que los sujetos de estudio asocien con los términos que consideran que definen la palabra, llamándose *palabras definidoras*. La cantidad de palabras dadas dejará ver la riqueza semántica que el sujeto tiene [5]. Una vez definidas estas palabras deberán ser jerarquizadas por orden de importancia para el sujeto lo que nos permitirá obtener una red semántica que remite de manera directa a los procesos de reconstrucción de la memoria [7].

La obtención de datos se realizó a través de la herramienta Google Trends [8] que proporciona acceso a una muestra representativa de las solicitudes de búsquedas realizadas en Google, durante el periodo de 05 de agosto del 2023 al 10 de agosto del 2024 en el territorio de México.

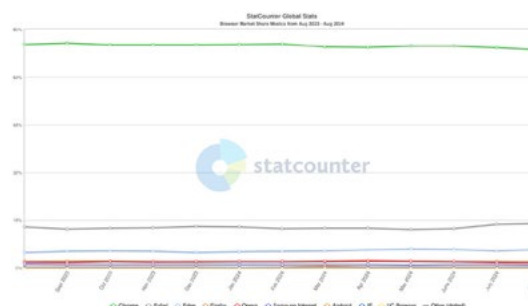


Fig. 1 Valores de uso de Navegadores en México.
Fuente: Statcounter [9]

Se eligió esta herramienta debido al uso casi monopolístico del buscador de Google en

México como se observa en la gráfica presentada en la “Fig.1” El navegador con mayor presencia de mercado en el país es Google Chrome con un 73.15% de uso, su mayor competidor es Safari que le sigue con un 14.9%, y Microsoft Edge con un 6.28% y con porcentajes por debajo del 5 %, Opera y Samsung [9].

Con estos datos vemos que el buscador con mayor presencia es Google. Con la herramienta de Google Trends que nos permite ver las tendencias en las búsquedas de Google y YouTube, podemos hacer un rastreo hacia las búsquedas más populares referentes a la Arquitectura. Google Trends permite seguir los temas que las personas buscan, dentro de límites geográficos y temporales específicos. Al ser un análisis exploratorio los datos generales proporcionados por Google, nos sirven como preámbulo para una investigación posterior, que siga la metodología original propuesta si se necesitasen datos cuantitativos y con respuestas directas.

En esta adaptación de la técnica, en la que los datos son obtenidos desde la virtualidad, se puede considerar que las búsquedas realizadas en Internet guardan una memoria colectiva, enfatizando a una memoria semántica cuyo orden se ve representado en la recopilación de datos brutos recolectados, es el investigador quién realiza una interpretación del significado basado en el contexto en el que ubica la información. Además, la propia herramienta seleccionada proporciona una jerarquización basada en la proporción de búsquedas [8] con la palabra estímulo elegida, por lo que la primera etapa y segunda etapa de la técnica RSN, son proporcionadas por la herramienta a utilizar.

Cabe aclarar que la metodología original tradicional [2], establece una aproximación personal y activa de los participantes de la muestra, sin embargo, en este caso se trata de una aproximación virtual no participante, lo

que hace que el análisis tenga un carácter interpretativo y exploratorio.

Para iniciar la exploración en cadena de palabras se proporcionó al buscador palabras estímulo, a las que a partir de este punto llamaremos *búsquedas estímulo*. Que el motor de aprendizaje (IA) enlazó con otros términos según la cantidad de búsquedas. Al ser datos de búsqueda normalizados no ayudará a indicar el estado semántico que las personas tienen sobre la búsqueda estímulo, pero si la jerarquización de búsqueda y consulta, así como la importancia, que socialmente se le da. Estas búsquedas se llamarán *Definidoras*, que serán jerarquizadas en orden de importancia de búsqueda, que nos llevará a los procesos de memoria colectiva.

Google Trends realiza la normalización de los datos de búsqueda según la hora y la ubicación de las consultas, cada punto de datos se divide por el total de búsquedas de la región geográfica y el intervalo de tiempo que representa para comprar si popularidad relativa, los números resultantes se indexan a un intervalo del 0 al 100 en proporción de un tema con respecto al total de las búsquedas del tema, siendo 100 el interés máximo para el tiempo y la ubicación seleccionada [8].

Se usaron las búsquedas estímulo con las palabras (1) ARQUITECTURA y (2) VIVIENDA, para la ejemplificación de la metodología en este artículo. La primera búsqueda es la disciplina sobre la que tenemos interés particular de sus redes y la segunda a partir de los resultados obtenidos de la primera búsqueda, al buscar una palabra genérica de uso común para la palabra casa. Se puede visualizar la metodología usada en la Fig. 2

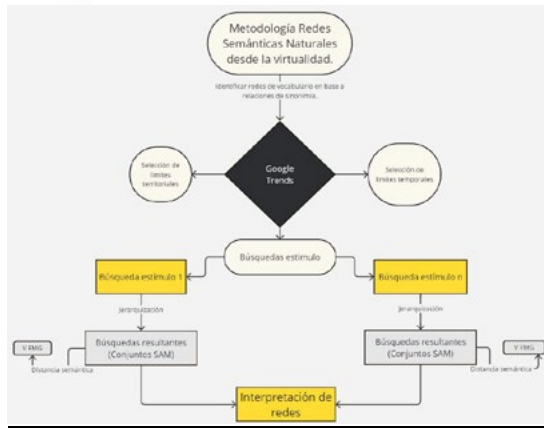


Fig. 2 Diagrama de flujo metodología. Elaboración propia

Se utilizó formato tabla, Tab.1, para recuperar y vaciar la información de los resultados principales de los que obtendremos los Valores FMG y los conjuntos SAM.

Tabla 1 Formato de tabla de resultados

Busqueda estimulo		Palabra o conjunto buscado	
Busqueda Definidora/ Conjunto SAM	Jerarquía	V FMG	
Busquedas resultantes	1-15	100-1	

En la técnica propuesta por Valdez [2], se hace mención de valores que se deben obtener para poder realizar la jerarquización de las búsquedas definidoras, nombrados J y M. En esta versión adaptada dichos valores no son requeridos para la obtención de los conjuntos SAM y los valores FMG, ya que la herramienta proporciona una equivalencia de jerarquización que cumple con los criterios establecidos para la obtención de valores. En la versión original de la técnica [5] se sugiere una cantidad de valores establecidos aún mayor, sin embargo, se considera que los datos obtenidos son suficientes para continuar con la técnica, al basarse la herramienta en un algoritmo de aprendizaje lingüístico (IA) basado en palabras claves. La IA analizará el comportamiento e interacción de los usuarios con los resultados de búsqueda

proporcionados, construyendo un algoritmo que presente concurrencias con el usuario.[11]

A continuación, se explican los valores sugeridos [2] para un entendimiento del criterio de exclusión.

Valor J: Total de Palabras definidoras generadas. Es un indicador de la riqueza semántica de la red [2].

Valor M: Es el resultado que se obtiene de la multiplicación que se hace de la frecuencia de aparición por la jerarquía obtenida para cada una de las palabras definidoras generadas. Es un indicador del peso semántico obtenido para cada una de las palabras definidoras obtenidas.

Conjunto SAM: Según el procedimiento original [5], son las 10 palabras definidoras que hubieran obtenido los valores M mayores, en una revisión Bravo [12] establece que el conjunto SAM es un indicador de cuales son las palabras definidoras que conforman el núcleo central de la red y sugiere 15 [2].

Valor FMG: Se obtiene para todas las palabras definidoras que conforman el conjunto SAM, a través de una regla de tres, tomando como punto de partida que la palabra definidora con el valor M más grande, representara el 100%. Este valor es un indicador en términos de porcentajes, de la distancia semántica que hay entre las diferentes palabras definidoras [2]. En la herramienta usada, este valor ya es dado. La puntuación dada se basa en una escala relativa en la que un valor de 100 indica el tema más buscado, un valor 50 indica los temas cuya frecuencia de búsqueda es la mitad de la frecuencia de búsqueda del tema más popular y así sucesivamente [13]. Para fines de este estudio se toma la sugerencia de Bravo [12] de tomar 15 búsquedas definidoras.

J.L.Valdez [2] en la explicación de la metodología de la técnica RSN menciona que en la técnica tradicional al hacer el recuento de palabras definidoras puede haber palabras con relaciones de sinonimia por lo que estas

palabras que a consideración del investigador son cercanas en su relación [6] pueden fusionarse como una sola categoría semántica, lo que involucra una normalización de los datos. En esta técnica virtual, debido a la normalización ya predefinida, se podrán fusionar los datos con sus respectivos valores en caso de ser idénticos². Esta elección se hará basándose en la elección de uso coloquial más usado, o la primera en aparecer, esta consideración queda a consideración del investigador.

3. Resultados

A partir de los datos obtenidos se pudo observar que la mayor cantidad de palabras generadas pertenece a vivienda con 25 búsquedas definidoras de las que se omitieron 3 palabras, en la jerarquía 2 y 3 se hace mención a la misma institución, una en siglas y la otra con su nombre detallado, se omite el segundo resultado al ser conocido coloquialmente por sus siglas. La siguiente omisión se encuentra en la jerarquización 14 y 15 con las palabras contrato de arrendamiento y contrato, ambos poseen los mismos valores de búsqueda, se mantiene la segunda opción al ser considerado una categoría. Al haber cumplido con la cantidad de 15 palabras sugeridas [12] se omiten las palabras restantes de la lista, se encuentran también sinónimos que no son contabilizados en J.

La búsqueda estímulo Arquitectura tiene 22 búsquedas definidoras de las que se omitieron 3, antes de mantener las primeras 15. Las tablas 2 y 3 muestran los Conjuntos SAM de 15 palabras de ambas búsquedas estímulos.

Se inició la búsqueda con la palabra Arquitectura, se observa el resultado en la Tab. 2 y las palabras definidoras tenían una amplia relación con el sector de estudiantes de la carrera de arquitectura, ya sean temas que se

ven dentro del plan curricular, diversas universidades del país, así como disciplinas afines. Esto podría explicar la menor cantidad resultante de búsquedas definidoras resultantes.

Tabla 2 Tabla de RSN jerarquizada para Arquitectura

Busqueda estímulo	Arquitectura	
	Jerarquía	V FMG
Busqueda Definidora/ Conjunto SAM		
Arquitectura - Campo de estudio	1	100
Arte - Tema	2	4
Diseño - Tema	3	4
Arquitecto - Ocupación	4	3
Facultad de Arquitectura UNAM	5	3
Universidad - Tema	6	3
Construcción - Tema	7	3
Escultura - Forma de arte visual	8	2
Edificio - Categoría de sitios de Interés	9	2
Ingeniería - Campo profesional	10	2
Plano - Geometría	11	1
La carrera de Arquitectura - Tema	12	1
Arquitectura brutalista - Estilo Arquitectónico	13	
Renderización - Categoría Software	14	1
UAEM - Tema	15	1

La segunda palabra estímulo fue vivienda, (ver Tab. 3) una palabra que tiene más alcance que arquitectura al no tener un sector de usuarios más específico, lo que resulto en una mayor cantidad de búsquedas definidoras, así como un mayor volumen de datos.

Una de las observaciones notadas en el ejercicio de la técnica fue el público objetivo al que llegaba la información, a través de análisis de discurso de los resultados a las búsquedas podemos notar que la primera búsqueda estímulo, tiene un público objetivo

² Se mencionarán las búsquedas definidoras que han sido omitidas

muy marcado, siendo profesionales del diseño quienes tienen más aproximación a la información, el contenido que existe relacionado a las búsquedas tienen un público limitado, lo que lleva a que lo que lleva hacia una corrección de las palabras estímulo que tenga un mayor alcance al público general.

En vivienda, se tiene un alcance mayor de público y se pueden detectar una cantidad más grande de actores que realizan estas búsquedas, siendo el principal, personas interesadas en la adquisición de vivienda.

Tabla 3 Tabla de RSN jerarquizada para Vivienda

Busqueda estímulo	Vivienda	
	Jerarquía	V FMG
Busqueda Definidora/ Conjunto SAM		
Vivienda - Función del edificio	1	100
Infonavit	2	12
Casa - Tipo de alojamiento	3	7
Crédito - Tema	4	7
Ahorro - Tema	5	4
Población - Tema	6	3
Bienestar social - Tema	7	3
Construcción - Tema	8	3
Censo - Estadística	9	3
Ley - Tema	10	2
Gobierno - Tema	11	2
Contrato - Tema	12	2
Sociedad - Tipo de institucion	13	2
Administradoras de Fondos para el retiro	14	2
Vivienda digna - Tema	15	2

4. Conclusiones

Este artículo presenta una metodología adaptada de las RSN aplicable a datos obtenidos de patrones de búsqueda de Google. Se determina que es posible replicar la técnica RSN en la virtualidad con los datos procesados ya que la IA responde a estas redes semánticas en los resultados proporcionados, lo que facilita el de conteo y normalización, permitiendo al investigador enfocarse en el análisis interpretativo.

El análisis de las redes semánticas desde la virtualidad permite identificar patrones de interés en las búsquedas realizadas de forma eficaz y al correlacionar los datos se adquiere un mayor reconocimiento a las tendencias actuales, convirtiéndose en una técnica que puede ayudar a mejorar el entendimiento del estado actual de la Arquitectura. Si bien para estudiar el significado a nivel mental más personal, así como la generación de estadísticas particulares se requiere la aplicación de la técnica en su forma tradicional, la adaptación satisface los objetivos planteados de exploración inicial.

Esta metodología puede ser útil también para estudios de mercado, investigación social, así como para el análisis de tendencias en otras disciplinas, en diferentes escalas territoriales y periodos temporales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología y Humanidades por los recursos otorgado para la realización de la investigación de la que forma parte este artículo.

Referencias

- [1] INEGI, "Estadísticas a propósito del día mundial del Internet", 2024 [Online] Disponible en: https://inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2024/EAP_DMInternet.pdf [Fecha de acceso: 18 Junio, 2024]
- [2] J.L. Valdez Medina, Las redes semánticas naturales, usos y aplicaciones en psicología social, México: UAEM, 1998

- [3] M.R. Quillian, "Word concepts: A theory and simulation of some basic semantics capabilities" *Behavioral Sciences*, vol. 12, no.5 pp. 410-430, 1967
- [4] G. Mead, *Espíritu persona y sociedad*. México: Paidós 1993
- [5] J.G. Figueroa, E. González, y V. Solis "Una aproximación al problema del significado: Las redes semánticas" *Revista Latinoamericana de Psicología* vol. 13 no.3 pp.447-458, 1981
- [6] V. H. A. Urzúa, "Medir el significado: las Redes Semánticas como Método de Investigación Sociológica" Tesis de disertación, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2008
- [7] J. L. Álvarez-Gayou Jurgenson, *Cómo hacer investigación cualitativa*. México: Paidós 2003
- [8] Google, "Preguntas frecuentes sobre los datos de Google Trends", 2024.[Online]. Available: <https://support.google.com/trends/answer/4365533?hl=es>. [Accessed: 24 Ago, 2024]
- [9] StatCounter, "Browser Market Share Mexico Aug 2023- Aug 2024", 2024. [Online]. Available: <https://gs.statcounter.com/browser-market-share/all/mexico> [Accessed: 05, Sept. 2024]
- [10] A.I. Zermelo Flores, A.C. Arellano Ceballos y V.A. Ramirez Vazquez, "Redes semánticas naturales: técnica para representar los significados que los jóvenes tienen sobre television, internet y expectativas de vidas". *Estudios sobre las culturas Contemporáneas*, vol. XI, no. 22 pp.305-334, 2005
- [11] B. Dean,, "Google Rankbrain: The definitive Guide", 2024 [Online] Available <https://backlinko.com/google-rankbrain-seo> [Accessed 20 Sept. 2024]
- [12] F.P. Bravo, "Análisis de la interacción de las estructuras lingüísticas y los conceptos en la determinación del significado del lenguaje", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de México, México, 1991
- [13] Google, "Google Trends", 2024 [Online] Available: <https://trends.google.es/trends?geo=MX&hl=es> [Accessed: 20, Sep. 2024]

Efecto del exceso de carga en camiones pesados en las distancias de frenado

Effect of Overloading on Heavy Trucks in Braking Distances

Autores: Guzmán Burelos Liliana
Chávez alegría Omar

Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México

Correo electrónico lguzman11@alumnos.uaq.mx
omar.chavez@uaq.mx

Palabras clave: VTM, Transporte de carga, Pesos, Configuración vehicular, Exceso, Velocidad, Distancia de Frenado.

Resumen-

El transporte de carga es vital para el movimiento de mercancías de un país. El abuso excesivo de los pesos permitidos por la normativa es comúnmente violado por los transportistas. Esto provoca daño a la carretera a corto plazo, accidentes mortales y distancias de frenado mayores, debido a las fuerzas que intervienen en el proceso para frenar el vehículo. A partir del análisis de datos de la báscula llamada 'Calamanda' ubicada en Querétaro, México, se obtuvieron pesos reales de las diferentes configuraciones vehiculares, con esta información se buscó ampliar la discusión, desde el enfoque de las fuerzas que se necesitan para frenar un vehículo. Los resultados obtenidos en la presente investigación indican que el incremento en la carga vehicular de este tipo de transporte asciende hasta un promedio de 500% más en un periodo de 2020 a 2023 y en peso el exceso es mayor del 50%, lo cual genera una distancia de frenado mayor a 60 metros para una velocidad de 80 km/hr. Como se puede observar la presente investigación tiene como principal motivación la seguridad del usuario, considerando que el Ingeniero diseñador deberá tomar en consideración dentro de sus parámetros de diseño los que aquí se presentan.

Keywords: Cargo transportation, Weights, Vehicle configuration, Excess, Speed, Stopping distance.

Abstract-

Cargo transportation is vital for the movement of goods in a country. However, excessive abuse of the weights allowed by regulations is commonly violated by carriers. This leads to damage to infrastructure in the short term. It promotes polluting emissions, fatal accidents, and longer braking distances, due to the forces involved in stopping the vehicle. The modeling presented herein is evaluated by analyzing data from the scale called Calamanda, located in the state of Querétaro, México. With this information, we will seek to expand the discussion, from the approach of the forces necessary to stop a vehicle. The results obtained in the present research indicate that the increase in the vehicular load for this type of transport has reached up to 500%, as an average, more from 2020 to 2023, and in weight, the excess is greater than 50%, which generates a stopping distance greater than 60 meters for a speed limit of 80 km/hr. As can be observed, the primary motivation of this research is user safety, considering that the design engineer should take into account the parameters presented here during the design process.

1. Introducción

En la actualidad, el movimiento de mercancías se realiza por medio del transporte de carga, debido a la facilidad de ofrecer sistemas logísticos de conexión y distribución a un precio atractivo para los contratistas [1].

En México, el transporte de carga mueve más de 500 millones de toneladas al año, siendo indispensable para la economía nacional [2].

Estos vehículos movilizan cerca del 84% de la carga interna por tierra y el 83% del total de carga del comercio exterior [3]. Entre los materiales que transporta, se encuentran materiales peligrosos, valores, artículos comerciales e hidrocarburos y recorren más de 453,386 kilómetros por la red carretera Federal de cuota y libre peaje [4]. La participación de los vehículos de carga es significativa en el país, por ello se regulan los pesos y dimensiones de las diferentes configuraciones vehiculares, mediante la normativa NOM-012-SCT-2-2017 [5]. Sin embargo, cuando la normativa es violada, trae consigo problemas como; costos de mantenimiento elevados provocados por el deterioro del pavimento acelerado, mayor desgaste de los frenos, amortiguadores y neumáticos, consumo de combustible elevado y los efectos negativos que no solo repercuten en la infraestructura carretera, ya que estos se traducen en accidentes graves o mortales, representando una alerta en la seguridad vial [6,7].

Autores como M. Vlkovský y P. Veselík han documentado la seguridad en el transporte de carga clasificándolo en errores relacionados con la seguridad de la carga en tres categorías distintas: errores intencionales, errores por descuido y errores no intencionales [8].

Los dos primeros tipos de errores están vinculados a una gestión deficiente o a una supervisión inadecuada de los empleados. Estos errores a menudo tienen un trasfondo económico, como la sobrecarga de los vehículos, la falta de cantidad o el mal estado de los equipos de sujeción, o surgen debido a un conocimiento insuficiente sobre cómo asegurar correctamente las cargas. Los errores no intencionales, ocurren de manera inconsciente, incluso cuando se cumplen las recomendaciones de las normas [7].

Aunque existen investigaciones acerca de este tema, no se analizan con los pesos reales con los cuales el transporte de carga transita por las carreteras mexicanas. Es por ello que la presente investigación propone un análisis de los pesos reales de los vehículos de carga que transitan por el Estado de Querétaro, con la base de datos de la báscula de 'Calamanda' para evaluar las distancias de frenado, considerando los pesos reales de las seis configuraciones vehiculares representativas, camiones unitarios (C2, C3), tractocamión (T3-S2, T3-S3) y tractocamión doblemente articulado (T3-S2-R4), como se muestra en la Fig. 1, de los años 2020 al 2023. Posteriormente se analizarán las distancias de frenado obtenidas.

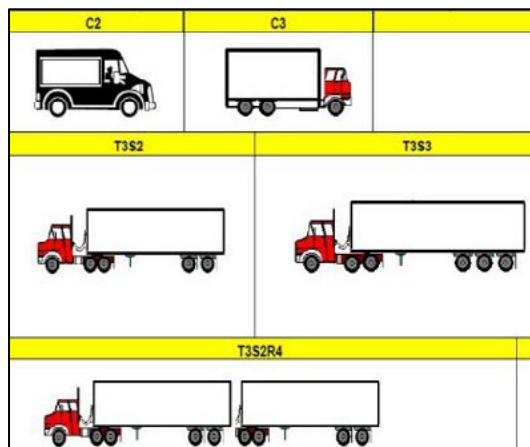


Figura. 1-Configuración vehicular
Fuente: Normativa NOM-012-SCT-2-2017.

2. Metodología

El presente artículo propone una metodología basada en cuatro pasos, los cuales comprenden, recopilación de la información, procesamiento de datos, desarrollo del modelo de frenado y análisis de resultados, que se desarrollan a continuación.

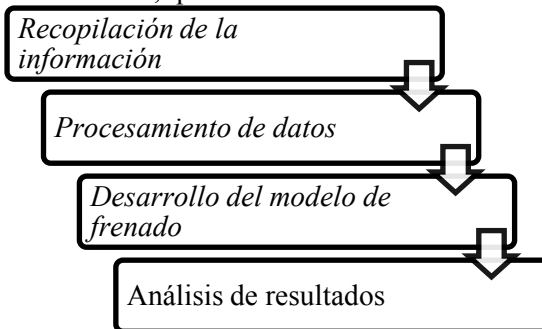


Figura. 2-Diagrama de flujo de la metodología

$$E_i^c + E_i^p = E_f^c + E_f^p + |WF_r| \quad (2)$$

1. Recopilación de la información

En la primera etapa se solicitó la base de datos proporcionada por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) delegación Querétaro, que comprendía los años 2020 al 2023.

El centro de control de peso llamado 'Calamanda' con las coordenadas; Latitud: 20°32'36.79"N, Longitud: 100°12'5.44"O. Ubicado en el municipio del Marqués, Querétaro. La elección de este punto de control, se debe a que se encuentra situado en la carretera 57D, la cual es parte de los principales corredores industriales del centro y occidente del país para el movimiento de cargas.

2. Procesamiento de datos

Con la información proporcionada, se realizó una filtración de los datos, la cual constó en dividir los pesos proporcionados por configuración vehicular, haciendo un promedio por configuración e identificando las masas máximas.

Este procesamiento se repitió para cada año antes mencionado.

Con la base de datos organizada y clasificada por años se realizaron gráficas por configuración vehicular, donde mostraba los cuatro años. En el eje de las X se mostraban los pesos y en el eje de las Y se mostraba la frecuencia en la que se tenían las masas. Dichas gráficas, se muestran en el apartado de resultados.

3. Desarrollo del modelo de frenado

Con la base de datos, proporcionados por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte, se realizó la programación en el software MATLAB (versión estudiantil R2024a), donde se programaron las Ecs. 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 [9], que consta en el principio de la conservación de la energía mecánica.

$$E_{inicial}^M = E_{final}^M + |WF_r| \quad (1)$$

Donde:

$E_{inicial}^M$ = Energía mecánica inicial

E_{final}^M = Energía mecánica final

$|WF_r|$ = Trabajo que hace la fuerza de rozamiento
Desarrollando la Ec. 1 se obtiene la Ec. 2,

Donde:

E_i^c = Energía cinética inicial

E_i^p = Energía potencial inicial

E_f^c = Energía cinética final

E_f^p = Energía potencial final

$|WF_r|$ = Trabajo que hace la fuerza de rozamiento
Para este caso se elimina la energía cinética final debido a que en el final del plano inclinado la velocidad será 0 y la no habrá energía potencial, debido a que no hay altura.

Donde la energía cinética está dada por la Ec. 3

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

Donde:

m = masa en kg

v = velocidad en m/s

La energía potencial está dada por la Ec. 4

$$E_p = (m)(g)(h) \quad (4)$$

Donde la altura (h) está dada por la Ec. 5

$$h = (d \sin \theta) \quad (5)$$

Donde:

m = masa en kg

g = gravedad en m/s²

d = distancia (m)

θ = Angulo que genera la pendiente (grados)

La fuerza de frenado está dada por la segunda Ley de Newton, como se muestra en la Ec. 6.

$$F_r = m(a) \quad (6)$$

Donde:

m = masa en kg

a = desaceleración en m/s²

La distancia de frenado se obtuvo con la división de la energía cinética y la fuerza de fricción menos la energía potencial como se muestra en la Ec. 7

$$d = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{F_r - mg \sin \theta} \quad (7)$$

Donde:

E_c = Energía cinética (kg. $\frac{m^2}{s^2}$)

F_r = Fuerza de fricción kg. $\frac{m}{s^2}$

E_p = Energía potencial kg. $\frac{m}{s^2}$

Las distancias de frenado se analizaron en 4 escenarios, considerando las variables: masa,

pendiente y velocidad. Las pendientes utilizadas fueron 3%, 4%, 5% y 6%, estas se tomaron en cuenta debido a que los perfiles topográficos de las carreteras, se encuentran en este rango. El peso se calculó multiplicando la masa por la gravedad, la velocidad inicial fue de 80 km/h debido a que esta es la velocidad de operación real de esa carretera de acuerdo con el estudio de velocidades del IMT [6] y una desaceleración de inicial de 10 m/s² que aumentaba directamente en función de la masa en estudio. En el cálculo de distancias de frenado, se considera coeficiente de fricción de 0.8.

Para el análisis de la influencia de la masa en las distancias de frenado se tomaron los porcentajes de exceso de carga más altos del análisis del Peso Bruto Vehicular (PBV). Con la base de datos proporcionada por la SICT.

4. Análisis de los resultados

Con los resultados obtenidos en la etapa 3 se realizó una gráfica para visualizar el efecto del peso en las distancias de frenado, con los resultados realizaron las discusiones y conclusiones.

3. Resultados y discusión

De acuerdo al procesamiento de datos, se puede apreciar un aumento en el parque vehicular que para los camiones unitarios de dos ejes (C2), en el año 2020 se obtuvo un crecimiento de los cuatro años de 438.25%, para los camiones de tres ejes (C3), tuvo un aumento de 379.23%. Para los camiones articulados (T3-S2 Y T3-S3), se tuvo un crecimiento de 507.23% y 423.17% respectivamente, en los cuatro años de análisis y por último el camión doblemente articulado tuvo un crecimiento de 397.03% como se puede ver en la Fig. 3.



Figura 3-Crecimiento anual de las cinco configuraciones vehiculares representativa.

De acuerdo con la base de datos proporcionados, se encontró que los vehículos unitarios de dos ejes (C2), presentaron un exceso de carga para el año 2020 al 2023, un porcentaje del 1.17%, 2.17%, 1.62% y 1.77%, como se muestra en la Fig. 4 se nota una tendencia en la frecuencia a un aumento significativo año con año, para esta configuración el peso normativo es 17.5 ton.

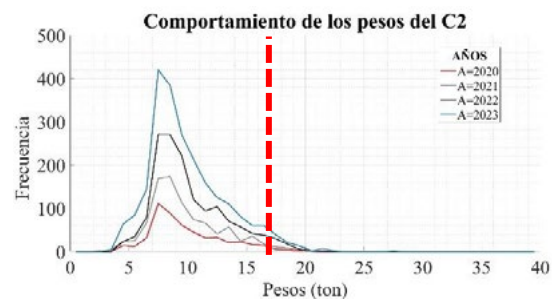


Figura 4-Peso Bruto Vehicular del camión unitario (C2)

En la Fig. 5 muestra un exceso de carga el periodo de 2020 al 2023 un exceso de carga de 3.02%, 6.94%, 5.10% y 6.22%. En la gráfica se muestra que los camiones unitarios (C3) transitan con una carga de 8 ton a 15 ton. El peso normativo para este vehículo es de 26 ton.

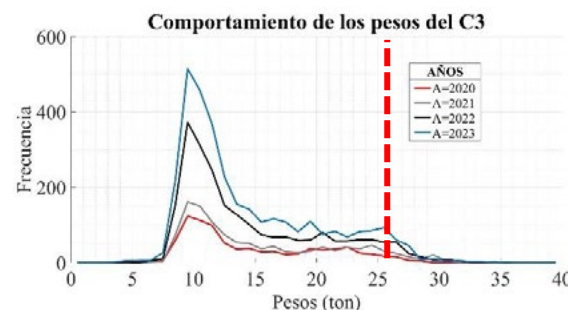


Figura 5-Peso Bruto Vehicular del camión unitario (C3)

En la Fig. 6 se muestra el análisis del gráfico que indica que los vehículos con cargas de 15 ton a 30 ton son los que transitan con mayor frecuencia, y existen otro grupo de unidades que transitan con cargas de 35 ton a 45 ton con una frecuencia media anual. Para el camión articulado (T3-S2), se obtuvieron porcentajes de exceso de carga de 1.42%, 2.13%, 1.92%, 2.03%. En esta configuración vehicular el peso normativo es de 44 ton.

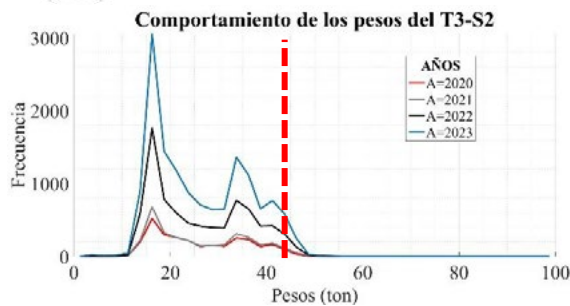


Figura 6-Peso Bruto Vehicular del camión articulado (T3-S2)

En el gráfico de la Fig. 7 se muestra una tendencia hacia el incremento de vehículos que transitan con cargas de 40 ton a 60 ton. Este vehículo presenta violaciones al peso normativo en 56.01% para el año 2020, 53.28% para el año 2021, para el siguiente año fue del 45.32% y para el último año fue de 51.24%. El peso normado es de 48.5 ton.

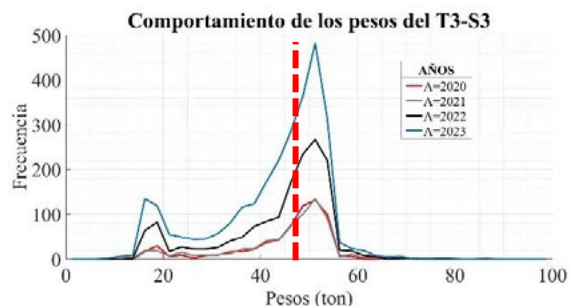


Figura 7-Peso Bruto Vehicular del camión articulado (T3-S3)

Los camiones articulados doble remolque T3-S2-R4, tienen un porcentaje de exceso de carga en 29.11%, 38.20%, 28.90% y 27.00%, siendo el segundo vehículo con mayor violación a la carga permitida por la norma. En la Fig. 8 se muestran dos cargas con la que transitan los vehículos con mayor frecuencia presentan cargas de entre 60 a 80 ton principalmente. El peso normado es de 66.5 ton

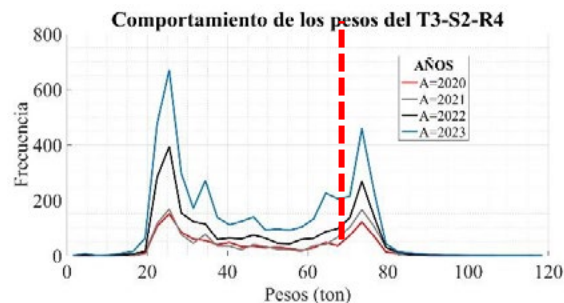


Figura 8-Peso Bruto Vehicular del camión doblemente

articulado (T3-S2-R4)

De acuerdo con las masas proporcionadas por la SICT, se tomaron los porcentajes de exceso de carga más altas para aplicar las Ecs. 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 mostradas en la metodología, evaluando 4 escenarios (pendientes de 3%, 4%, 5% y 6%). Los resultados se muestran en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1- Resultados obtenidos para velocidad de 80 km/h

Configuración Vehicular	Masas (kg)	Distancias de Frenado (m)			
		I	II	III	IV
Camión unitario (C2)	17500.00	12.53	12.59	12.66	12.72
	17879.75	12.80	12.86	12.92	12.99
Camión unitario (C3)	26000.00	18.53	18.59	18.65	18.71
	27804.40	19.80	19.86	19.92	19.98
Camión articulado (T3-S2)	44000.00	31.22	31.28	31.35	31.41
	44937.20	31.88	31.95	32.01	32.07
Camión articulado (T3-S3)	48500.00	34.40	34.46	34.52	34.58
	74340.80	52.63	52.69	52.75	52.81
Camión doblemente articulado (T3-S2-R4)	66500.00	46.91	46.91	46.92	46.92
	91903.00	65.02	65.08	65.14	65.20

I=Escenario con Pendiente del 3%, II=Escenario con Pendiente del 4%, III=Escenario con Pendiente del 5%, IV=Escenario con Pendiente del 6%

Para todas las configuraciones se analizó con la carga normativa y con los porcentajes de exceso de carga obtenidos del análisis de los datos, para el camión unitario de 2 ejes, tiene una masa de 17,500 kg de acuerdo a la norma NOM-012-SCT-2-2017 [5], posteriormente se evaluó con un exceso de carga de 2.17 % con esto se obtuvo una masa de 17,879.75 kg. Para el camión unitario de 3 ejes (C3) se obtuvo un peso normativo de 26,000 kg, después se analizó la masa con un exceso de carga de 6.94%, resultando una masa de 27,804.40 kg. Para el camión articulado (T3-S2) se analizó con el peso normativo de 44,000 kg y con un exceso de carga de 2.13% donde se obtuvo una masa de 44,937.20 kg. Para el camión articulado (T3-S3) se analizó una masa normativa de 48,500 kg y una masa con exceso de carga de 53.28% obteniendo una masa de 74,340.80 kg. El camión doblemente articulado (T3-S2-R4) se analizó con una masa normativa de 66,500 kg, posteriormente un exceso de carga de 38.20% obteniendo una masa de 91,903 kg.

Tabla 2- Resultados obtenidos para velocidad de 120 km/h

Configuración Vehicular	Masas (kg)	Distancias (m)			
		I	II	III	IV
Camión unitario (C2)	17500.00	26.83	26.96	27.09	27.22
	17879.75	27.40	27.53	27.66	27.79
Camión unitario (C3)	26000.00	39.68	39.80	39.93	40.06
	27804.40	42.41	42.53	42.66	42.79
Camión articulado (T3-S2)	44000.00	66.89	67.01	67.14	67.26
	44937.20	68.30	68.43	68.56	68.68
Camión articulado (T3-S3)	48500.00	73.69	73.82	73.94	74.07
	74340.80	112.75	112.88	113.00	113.13
Camión doblemente articulado (T3-S2-R4)	66500.00	100.53	100.53	100.53	100.53
	91903.00	139.30	139.43	139.55	139.68

I=Escenario con Pendiente del 3%, II=Escenario con Pendiente del 4%, III=Escenario con Pendiente del 5%, IV=Escenario con Pendiente del 6%

Con los datos propuestos se puede notar que los vehículos aumentan su distancia de frenado con referencia en su masa inicial, modificando directamente la desaceleración del vehículo y obteniendo mayor distancia de frenado, con base en lo observado se propone un pictograma en el apartado de señales restrictivas para colocarlos en las carreteras donde transitan los camiones de carga, proponiendo una distancia de 150 m debido a que se considera una velocidad de 120 km/h, esta distancia está dentro del rango de National Highway Traffic Safety Administration que para los vehículos de tres ejes propone una distancia de 80 m con una velocidad de 120 km/h [10] y con la regla del cuadrado se comprobó que para velocidades de 120 km/h se tienen distancias de 144 m [11].

Esta señal tiene la finalidad de informar a los usuarios de las carreteras que los vehículos de carga necesitan una distancia suficiente para hacer maniobras en caso de presentarte un problema en los frenos y que en ese escenario no ponga en riesgo a los vehículos que se encuentran en su entorno. Y para las autoridades que se regule de acuerdo a las cargas reales.



Figura 9- Señal restrictiva propuesta.

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo indican que el parque vehicular tiene una tendencia ascendente para todas las unidades analizadas por configuración vehicular en un periodo de cuatro años (2020-2023), siendo los camiones doblemente articulados (T3-S2 y T3-S3) los que incrementaron en mayor porcentaje (507.23% y 523.17%). También se concluye que el camión articulado (T3-S3) obtuvo el mayor porcentaje de exceso con respecto a la normativa de pesos y dimensiones tolerables con 54.46% y el camión doblemente articulado (T3-S2-R4) con 30.80%. Esta tendencia, revela la falta de regulación en la carga con la cual un vehículo puede conducir de manera segura. Estos excedentes de carga producen accidentes todos los días en vialidades de todo el país, con las consecuencias nefastas por una autoridad omisa y una falta de consciencia de parte de los usuarios de transporte de mercancías.

Partiendo de los datos analizados se pudo determinar que las distancias de frenado aumentan debido a la masa (PBV). Obteniendo variaciones de distancia de 46.92 m hasta 65.20 debido al exceso de carga, considerando una velocidad de 80 km/h y con una velocidad de 120 km/h de 100.53 m a 139.30 m. Con esto se comprueba que el exceso carga produce mayor inercia, lo que significa que requiere más

fuerza para detenerse. Aplicando la segunda ley de Newton, establece que la fuerza es igual a la masa por la aceleración ($F = m \cdot a$) fuerza que se puede convertir en fuerza de impacto. Por lo tanto, un camión más pesado necesita más tiempo y distancia para reducir su velocidad. Esto representa peligro para el transporte de carga ya que, al colocar mayor peso a la unidad, se presentan mayor desgaste de los frenos y esto reduce su eficiencia, provocando que estos puedan fallar.

Por ello se propuso el pictograma mostrado en la Fig. 9, donde se busca informar a los usuarios de las carreteras que necesitan mantener una distancia mínima entre vehículos de carga y su vehículo, con el fin de tener espacio para hacer maniobras que salvaguarden la vida de las personas y se plantea una revisión a la normativa que incluya penalizaciones monetarias al uso excesivo de carga.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología por los recursos otorgados y a la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte del estado de Querétaro por los datos proporcionados.

Referencias

- [1] Arturo Contreras Juárez, Marcelino García Miguel, G. Avidahi, and Jair Damián Baéz Hernández, "Impacto Socio-económico del transporte de carga en México," *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 7, no. 14, pp. 32–38, jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.29057/escs.v7i14.5540>.
- [2] J. Nuñez Lara, "Avances Tecnológicos para el Transporte de Carga en México," *CONALTRANS*, pp. 6–7, Mar. 2023, Accessed: Sep. 05, 2024. [Online]. Available: https://issuu.com/gestiongubernamental-mexico-gov/docs/conaltrans_mexico_2023
- [3] Instituto Mexicano del Transporte and Secretaría de Comunicaciones y Transportes, "MANUAL ESTADÍSTICO DEL SECTOR TRANSPORTE 2015," Dec. 2015. Accessed: Sep. 05, 2024. [Online]. Available: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/Manual/mn2015.pdf>
- [4] M. C. Espino Barros, "Reingeniería Para El Diseño De Un Esquema De Financiamiento Para Pymes De Autotransporte

De Carga Federal," Tesina, Instituto Politécnico Nacional, 2016. Accessed: Sep. 05, 2024. [Online]. Available: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/20309/1/Tesina%20%C3%BAltima%20final%20por%20siempre%20con%20modificaciones%20finales%20del%20final.pdf>

[5] Secretaría de Gobernación, *Pesos y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.*, vol. NOM-012-SCT-2-2014. 2017. Accessed: Sep. 02, 2024. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#gsc.tab=0

[6] Secretaría de Comunicaciones y Transportes and Instituto Mexicano del Transporte, "El sobrepeso en el transporte carretero de carga: elementos para su estudio y control," Oct. 24, 2004.

[7] A. Zuska, D. Kurczyński, and J. T. Jackowski, "Study of Loads Acting on the Load during the Sudden Braking of a Vehicle," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, p. 1559, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13031559>.

[8] M. Vlkovský and Petr Veselík, "Cargo Securing - Comparison of Different Quality Roads," *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, vol. 67, no. 4, pp. 1015–1023, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.11118/actaun201967041015>.

[9] J. Solbes, F. Tarín, R. Botet, and P. Valencia, "La Conservación De La Energía: Un Principio De Toda La Física. Una Propuesta Y Unos Resultados," *Investigación didáctica*, vol. 22, no. 2, pp. 185–194, 2004.

[10] National Highway Traffic Safety Administration, "Federal Motor Vehicle Safety Standards; Air Brake Systems," Aug. 01, 2011. [efaidnbmnnnibpcajpeglclefindmkaj/https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/121_stopping_distance_fr.pdf](https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/121_stopping_distance_fr.pdf) (accessed Sep. 18, 2024).

[11] Autofact, "Distancia de seguridad entre un auto y otro: Multa por no respetarla - Autofact," *Autofact.com.mx*, Feb. 09, 2024. <https://www.autofact.com.mx/blog/mi-carro/infracciones/distancia-de-seguridad#:~:text=pa%C3%ADs%20no%20respetarla-> (accessed Sep. 19, 2024).

Acciones de mejoras en la eficiencia energética basado en la ISO 50 001:2018. Un caso de estudio del sector hotelero

Energy efficiency improvement actions based on ISO 50 001:2018. A case study of the hotel sector

Iturralde Carrera Luis Angel¹, Valdivia Nodal Yarelis², Rodríguez Reséndiz Juvenal¹,
Álvarez Alvarado José Manuel¹, Jiménez Borges Reinier³, Zúñiga Castillo Cinthya
Alejandra¹.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

²Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Morelos, México.

³Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.

Correo electrónico (liturralde28@alumnos.uaq.mx)

Palabras clave: Eficiencia energética, sistemas de gestión, sector hotelero, días grados, línea base energética, indicador de desempeño energético.

Resumen- Este estudio analiza la implementación de la norma ISO 50001:2018 para mejorar la eficiencia energética en el sector hotelero, enfocado en un hotel en Cuba. Históricamente, el crecimiento económico ha dependido del uso de energía, lo que ha causado impactos ambientales y contribuido al cambio climático. En respuesta, la eficiencia energética emerge como una estrategia clave para reducir costos y aumentar la competitividad, especialmente en la industria turística, que busca balancear el servicio al cliente con la reducción del consumo energético. En el caso estudiado, el análisis mostró que más del 95% del consumo energético del hotel proviene de la electricidad. Entre las oportunidades de mejora, se destacó la sustitución de bombillos de alta potencia por alternativas más eficientes, lo que generó una tasa interna de retorno del 28% y un periodo de recuperación de 3,6 años. La generación del sistema solar fotovoltaico (SSFV) es de 802 880 kWh/año para 804 módulos y un PR medio de 91,72%, diseñado con el fin de cambiar la matriz energética. Finalmente, se diseñó un indicador que correlaciona el consumo energético con las habitaciones ocupadas y los días grados, implementando así estrategias efectivas para mejorar la eficiencia energética sin comprometer la calidad del servicio.

Keywords: Energy efficiency, management systems, hotel sector, degree days, energy baseline, energy performance indicator.

Abstract- This study analyzes the implementation of ISO 50001:2018 to improve energy efficiency in the hotel sector, focusing on a hotel in Cuba. Historically, economic growth has depended on energy use, which has caused environmental impacts and contributed to climate change. In response, energy efficiency emerges as a key strategy to reduce costs and increase competitiveness, especially in the tourism industry, which seeks to balance customer service with reduced energy consumption. In the case studied, the analysis showed that more than 95% of the hotel's energy consumption comes from electricity. Among the opportunities for improvement, the replacement of high-power light bulbs with more efficient alternatives was highlighted, which generated an internal rate of return of 28% and a payback period of 3,6 years. The generation of the solar photovoltaic system (SSFV) is 802 880 kWh/year for 804 modules and an average PR of 91,72%, designed to change the energy matrix. Finally, an indicator was designed that correlates energy consumption with

occupied rooms and degree days, thus implementing effective strategies to improve energy efficiency without compromising the quality of service.

1. Introducción

A lo largo de la historia, los grandes avances económicos de la humanidad han estado estrechamente vinculados a importantes desarrollos energéticos. Desde la aparición del fuego, que proporcionó mayor seguridad y mejor alimentación, hasta la Revolución Industrial y, en la actualidad, los avances en el ámbito energético que impulsan nuestro progreso [1][2][3].

Sin embargo, estos avances han tenido un impacto negativo en el medio ambiente, generando un deterioro significativo que ha impulsado el cambio climático, un fenómeno que parece imparable [4][5]. El cambio climático según [6] es uno de los principales problemas globales debido a sus múltiples consecuencias, que van desde alteraciones en los patrones meteorológicos hasta la ocurrencia de desastres naturales.

De acuerdo con [7][8], mejorar la eficiencia energética es equivalente a reducir costos, bajar precios, incrementar las ganancias y mejorar tanto la calidad como la competitividad de las empresas en el mercado. No obstante, la eficiencia energética debe entenderse enfocada a la optimización en la producción, distribución y uso de la energía, para así obtener resultados positivos en todos los procesos que dependen de ella [9].

El sector turístico también debe ofrecer un servicio que satisfaga plenamente las demandas de los clientes, al mismo tiempo que minimiza el consumo, el gasto energético y los impactos negativos sobre el medio ambiente [10][11].

Desde hace varias décadas, los Sistemas de Gestión de la Energía se han consolidado como una herramienta clave para optimizar el uso y consumo de energía en cualquier organización, sin importar su sector o tamaño

[12][13]. En la actualidad, la norma ISO 50001 ha establecido un marco avanzado dentro de estos sistemas, proporcionando directrices para mejorar el desempeño energético de las organizaciones [14][15].

Actualmente, el turismo desempeña un papel clave en la economía cubana. El desarrollo del sector no solo debe enfocarse en generar nuevos ingresos, sino también en alcanzar una eficiencia económica que favorezca el ahorro de recursos [16][17].

Las instalaciones hoteleras se distinguen por ser edificaciones de uso continuo durante todo el año, cuyo principal objetivo es ofrecer confort y calidad en todos los servicios para los huéspedes durante su estancia. En estos edificios, predominan aspectos como el tránsito constante de los huéspedes desde las habitaciones hacia otras áreas externas, la abundancia de cristalería, la heterogeneidad en los tipos de habitaciones y el amplio uso de sistemas de aire acondicionado [18][19][20].

Estos elementos influyen definitivamente en los elevados niveles de carga térmica. Por tanto, para las actividades relacionadas con el sector turístico constituye un verdadero reto alcanzar la eficiencia energética sin comprometer la calidad de los servicios que se brindan.

2. Materiales y Métodos

Gestión de la energía

La norma ISO 50001 es una herramienta que orienta a las empresas de cualquier sector en el desarrollo e implementación de un sistema de gestión energética. Este sistema se enfoca en la mejora continua del desempeño energético, lo que resulta en un ahorro de energía y, por ende, en un ahorro económico [21][22] [23][24].

Planificación energética en sistemas de gestión energética según la Norma ISO 50 001: 2018.

El proceso de planificación se inicia con un entendimiento exhaustivo en materia de gestión energética de la empresa, mediante mediciones y estudio de todas las actividades y condicionantes que impactan en el rendimiento energético [25][26].

La Figura 1 muestra de manera simplificada por etapas el proceso de planificación energética.

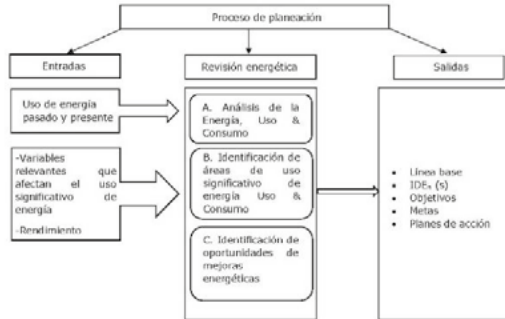


Fig. 1. Entradas, revisión y salidas de la etapa de planificación energética.

La línea de base energética es una de las herramientas en la gestión más sencilla, suponiendo que se disponga de datos históricos sobre las variables relevantes o sobre el propio indicador. Esta línea de base sirve como referencia cuantitativa para comparar el rendimiento energético. Se establece utilizando datos medidos para derivar una función de regresión lineal que describa el consumo energético de la empresa en relación con su producción. A continuación, se muestra la línea de base energética (1).

$$E = m * P + E_0 \quad (1)$$

Donde:

E = Energía consumida.

m=pendiente de la ecuación.

P=producción proporcionada de la empresa

E₀= Energía no asociada a la producción

Una vez establecido el periodo de referencia o la línea de mejor ajuste mediante el análisis de regresión lineal, sirve como referencia energética para supervisar y evaluar el rendimiento energético de la empresa. El indicador teórico de rendimiento energético de la empresa (IDEN_t) (2) se obtiene a partir de

la relación entre la ecuación energética de la organización y la variable independiente.

$$IDEN_t = \frac{E_t}{DD * P} \quad (2)$$

Donde:

E_t= energía teórica de partida

P= producción

DD = grados-día

Resultados y discusión

La matriz energética (Figura 2) es una herramienta que permite evaluar el rendimiento del hotel en términos de gestión de energía. Los resultados que se muestran son mediante encuestas realizadas a la alta dirección del hotel se evalúa por un puntaje arbitrario.



Fig. 2. Matriz de gestión energética

La matriz refleja una gestión energética promedio de 2, que será considerada en el análisis. El área de Divulgación y Capacitación muestra el desempeño más bajo, siendo el único indicador por debajo de la media debido a la falta de un método para promover acciones de gestión energética en el hotel. Sin embargo, se destaca una política energética bien definida, que supera la media, junto con una adecuada organización, comunicación, monitoreo y control.

El análisis de los consumos energéticos para el periodo 2022-2023 revela que la electricidad es el recurso de mayor consumo en el hotel. Aunque hubo una ligera reducción en el uso de electricidad, pasando de 468,07 MWh en 2022 a 465,18 MWh en 2023, su porcentaje en relación con los demás recursos energéticos

aumentó de 95,46% a 96,30%, lo que refleja una disminución en el consumo de diésel y gasolina. Esto resalta la importancia de enfocarse en el ahorro, control y supervisión del uso de electricidad, ya que sigue siendo el mayor consumidor entre los recursos energéticos de la instalación en ambos años. Para más detalles, consultar las Figuras (3).

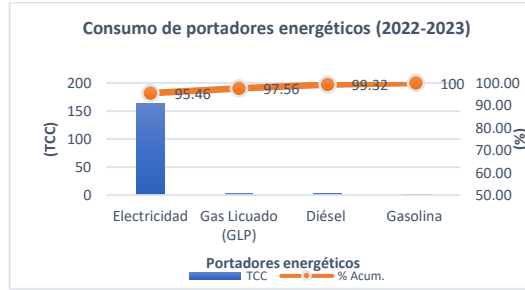


Fig. 3. Consumo de portadores energéticos para el 2022-2023. El censo de carga se realizó a partir de un levantamiento exhaustivo de todos los equipos que consumen energía eléctrica en las distintas áreas del hotel. Con base en los datos de las placas de los equipos y la información proporcionada por los empleados, se identificaron las potencias, tiempos y modos de uso de cada equipo. La Figura 4 muestra el análisis de cuál área es la mayor consumidora de electricidad.

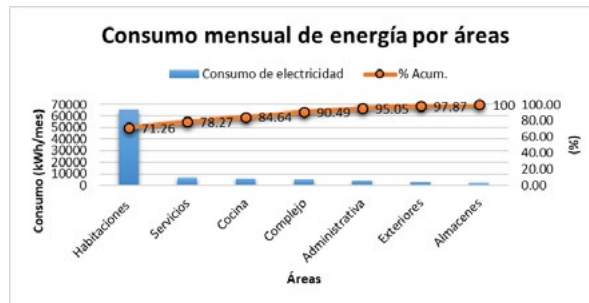


Fig. 4. Consumo mensual de energía eléctrica por áreas.
A Análisis comparativo de la distribución de consumidores dentro del hotel

Para un mejor análisis de los equipos consumidores de electricidad y los servicios donde incide su consumo se realizó la Figura 5 las cuales analizan la distribución de consumidores en el hotel.

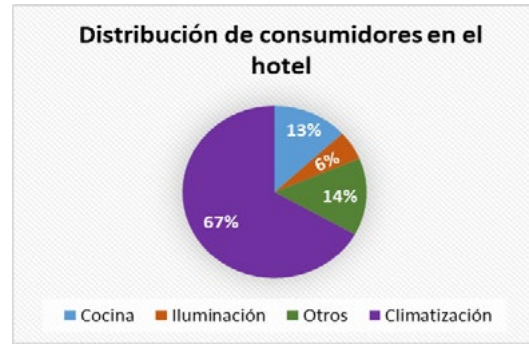


Fig. 5. Distribución de consumidores en el hotel
B Línea Base Energética (LBen)

Diversos estudios han demostrado que la correlación entre las variables consumo de energía y las Habitaciones Días Ocupadas (HDO) es generalmente baja. Sin embargo, diversas investigaciones concuerdan en que la variable Días Grado (DG) influye considerablemente en el consumo energético, especialmente cuando la climatización es uno de los principales consumidores de energía en el hotel. Por lo tanto, es importante incorporar los DG como un factor clave en el análisis del consumo energético.

Para un día, los días grado se calculan de la siguiente manera:

$$DG_{día} = (T_d - T_{ref}) \quad (3)$$

Para un mes los días grados se determinan como:

$$DG_{mes} = \sum DG_{día} \quad (4)$$

Donde:

$DG_{día}$: Días grados del día;

DG_{mes} : Días grados del mes;

T_d : Temperatura promedio de cada día del mes ($^{\circ}\text{C}$);

T_{ref} : Temperatura de referencia (18°C)

Una vez identificado el período base o línea de mejor ajuste mediante un análisis de regresión lineal, este puede utilizarse como la línea base

energética. A partir de esta referencia, es posible monitorear el comportamiento del consumo de la entidad, reflejada mediante la Figura 6.

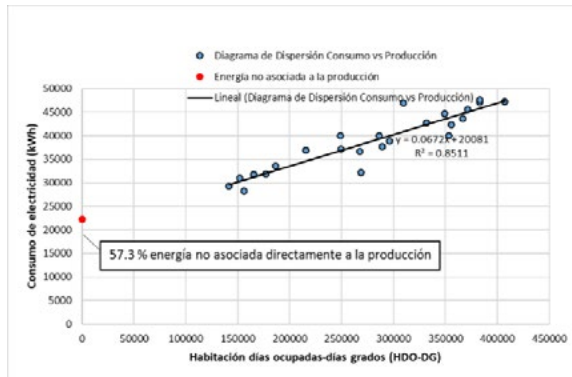


Fig. 6. Correlación entre el consumo de energía y las HDO-DG. La línea meta muestra un modelo de regresión lineal simple, una mejora en la Coeficiente de Determinación que representa la correlación de los datos y una reducción del 5,3% en la energía no vinculada al proceso, lo que equivale a un ahorro de 1,088 kWh (Figura 7).

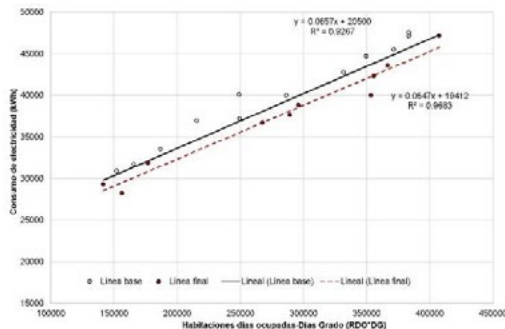


Fig. 7. Correlación entre el consumo de energía y las HDO-DG filtrado.

El gráfico anterior no solo evidencia una buena correlación, sino que también respalda la validez del indicador de desempeño energético diseñado. La línea azul refleja cómo podemos predecir el consumo energético en diferentes escenarios, como variaciones en las temperaturas a lo largo del año o cambios en el flujo de huéspedes. Esta capacidad predictiva es crucial para anticipar las necesidades energéticas de manera más precisa. Por otro lado, la línea roja ilustra el potencial de mejora en el consumo energético

si se optimiza la gestión de la energía en la entidad, destacando las oportunidades para reducir costos y mejorar la eficiencia operativa mediante estrategias de ahorro energético y tecnologías más eficientes. Este análisis no solo justifica el uso del indicador, sino que refuerza su utilidad en la toma de decisiones para la mejora continua del desempeño energético.

C Indicador de Desempeño Energético (IDEn)

El Indicador de desempeño energético teórico (IDEnt) para la entidad se obtiene de relacionar la ecuación de energía de la línea base entre la variable independiente, en el caso de estudio, el producto de los Días-Grados y las HDO (Figura 8).

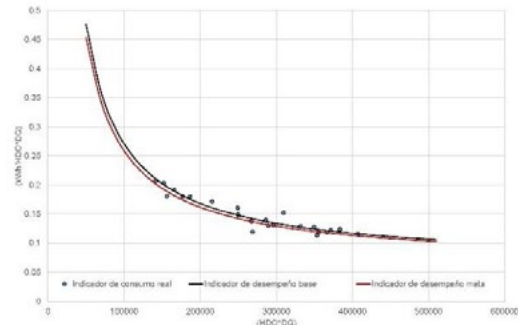


Fig. 8. Indicador de desempeño energético.

D Comprobación del IDEnt mediante regresión múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple fue desarrollado para comprobar la efectividad de las variables (Consumo de energía, HDO y DG), determinándose para este caso el R^2 del modelo mediante el valor-p. La ecuación de línea base (5) presentada tiene la forma:

$$Y = aX_1 + bX_2 + c \quad (5)$$

El coeficiente R^2 obtenido para el modelo fue de 0,90, para un total de 24 observaciones. Las Figuras 9 y 10 muestran el comportamiento de los datos y ofrecen una representación más compleja al incluir un plano de tendencia que facilita una mejor visualización comparada

con las representaciones tradicionales en dos dimensiones. Este enfoque permite capturar las interacciones entre múltiples variables, proporcionando una visión más precisa y completa del sistema analizado.

El uso del análisis multivariable en este contexto es clave, ya que permite considerar todas las variables relevantes de manera simultánea en el cálculo del indicador. Esto mejora significativamente la precisión del modelo, dado que, en escenarios reales, el desempeño energético o cualquier otro indicador no depende de una sola variable, sino de la interacción de múltiples factores como temperatura, flujo de huéspedes, condiciones operativas y patrones estacionales.

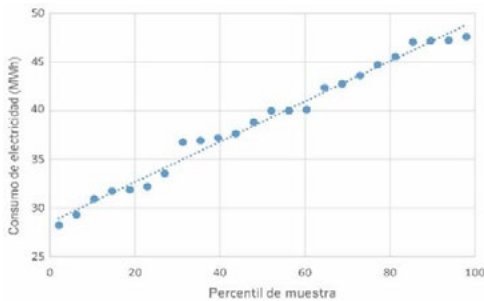


Fig.9. Gráfico de probabilidad normal.

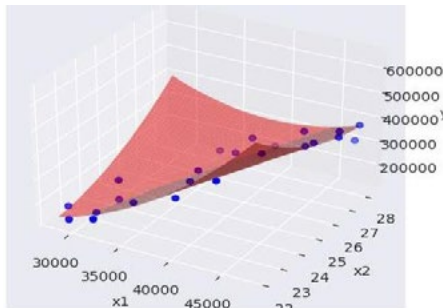


Fig.10. Análisis multivariado en tres dimensiones.

E Oportunidades de ahorro

Según los problemas detectados se propone:

En climatización, se sugiere limpiar los equipos regularmente, ajustar termostatos a 24°C, utilizar cortinas para reducir el calor, y priorizar habitaciones con menor carga

térmica según la temporada. Además, la sustitución de sistemas convencionales por tecnologías más eficientes, como los aires acondicionados tipo inverter, puede generar ahorros significativos. En cuanto a datos y comunicaciones, las medidas incluyen apagar equipos cuando no se utilicen, configurar los modos de suspensión y preferir monitores LED. Las impresoras y faxes también deben optimizarse con modos de ahorro de energía y opciones de impresión doble. Los motores eléctricos deben operar a su máxima eficiencia, y en los hornos se debe garantizar la hermeticidad, reducir tiempos de espera y optimizar el aislamiento térmico. Estas acciones, aplicadas de manera sistemática, pueden reducir de manera considerable el consumo energético del hotel, mejorando su eficiencia operativa y minimizando los costos.

Para aumentar el ahorro de la energía eléctrica, se realizó el estudio de la sustitución de la luminaria, un total de 80 bombillos marca Ilumenova (CFL, 15W, 6500k, 120V/60Hz, E27), la propuesta es sustituirlos por bombillos marca Gedeme (Bulbos LED, E27, 9W)

El precio promedio del kW para el hotel es de 1,07 cup y el de los bombillos es de 2 USD=48cup por medio del Banco de Cuba se realizó la convección de moneda. Estos bombillos poseen una vida útil de 50 000 h y los mismos tienen un régimen de trabajo de 12h al día.

Vida útil del bombillo

- $50\,000 \text{ horas} / 365 \text{ días} (12 \text{ horas de trabajo al día}) = 50\,000 \text{ horas} / (365 \times 12) = 11 \text{ años}.$

La Figura 11 presenta el VPN calculado y el periodo de recuperación de la inversión.



Fig.11. VPN y PRI para el hotel.

Después del análisis anterior, se realizó el dimensionamiento de un SSFV en el software PVsyst 7.3 con el objetivo de sustituir las fuentes convencionales de energía.

Las Figuras 12 y 13 muestran la generación anual del SSFV de 802 880 kWh/año para 804 módulos y un PR medio de 91,72%. En el análisis los meses más críticos en el PR son el primer y último trimestre del año debido a la baja irradiación en estos meses, lo que tiene una relación directa con la producción del sistema.

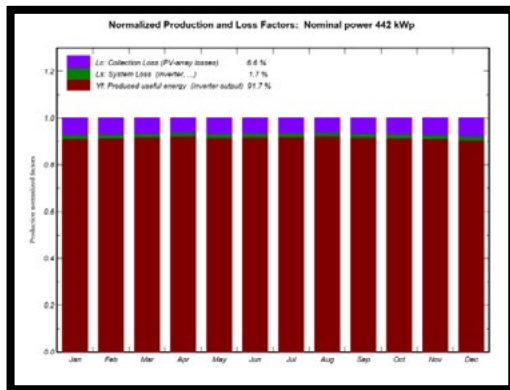


Fig.12. Producción normalizada y Factor de pérdidas.



Fig.13. Dimensionamiento del SSFV.

3. Conclusiones

En el caso del hotel estudiado, se determinó que la electricidad es el principal portador energético, constituyendo más del 95% del consumo total de energía en la instalación

durante los años 2022-2023. Las áreas que presentan el mayor consumo son las Habitaciones, Servicios y Cocina, que en conjunto suman el 84,64% del total.

El modelo de regresión lineal múltiple es altamente efectivo para analizar la relación entre las variables estudiadas (Consumo de energía, HDO y DG) y la variable dependiente. El coeficiente de determinación R^2 de 0.90 confirma un ajuste sólido del modelo a los datos. Además, el comportamiento casi lineal refuerza la precisión del modelo, validando su utilidad para realizar predicciones fiables en base a los datos analizados.

Dentro de las oportunidades de mejoras se identificó la sustitución de 80 bombillos de la marca Illumenova con 15 W por bombillos LED de bajo consumo (9W). La inversión presenta una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 28%, un Valor Actual Neto (VAN) de 8 578,98 \$CUP y un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de 3,6 años. La generación anual del SSFV de 802 880 kWh/año para 804 módulos y un PR medio de 91,72%.

Referencias

1. V. Smil, *Energy and Civilization: A History*, MIT Press, 2017.
2. IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2021.
3. International Energy Agency (IEA), *Energy Efficiency 2022: Analysis and Outlook to 2050*, IEA, 2022.
4. N. Stern, *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press, 2007.
5. S. Sorrell, "Jevons' Paradox Revisited: The Evidence for Backfire from Improved Energy Efficiency," *Energy Policy*, vol. 37, no. 4, pp. 1456-1469, 2009.
6. W. Steffen et al., "The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration," *The Anthropocene Review*, vol. 2, no. 1, pp. 81-98, 2015.

7. ISO, *ISO 50001:2018 - Energy Management Systems – Requirements with Guidance for Use*, ISO, 2018.
8. T. M. Lawrence et al., "Energy Management Systems for Building Energy Efficiency Improvement," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 100, pp. 35-44, 2019.
9. J. H. Miah et al., "A Framework for Assessing the Environmental and Economic Performance of Energy Management Systems in Manufacturing Operations," *J. Cleaner Prod.*, vol. 246, p. 118986, 2020.
10. S. Luthra et al., "Barriers to Energy Efficiency Improvement in the Manufacturing Sector: A Review," *J. Cleaner Prod.*, vol. 107, pp. 474-487, 2015.
11. A. B. Jaffe and R. N. Stavins, "The Energy-Efficiency Gap: What Does It Mean?," *Energy Policy*, vol. 22, no. 10, pp. 804-810, 1994.
12. J. A. Olias et al., "Energy Management in Industrial Companies: A Systematic Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1415-1435, 2015.
13. P. Antunes, P. Carreira, and M. Miranda Silva, "Towards an Energy Management Maturity Model," *Energy Policy*, vol. 73, pp. 802-814, 2014.
14. A. Ürge-Vorsatz et al., "Advances in Technologies and Management for Energy Efficiency and Load Reduction in Buildings," *Energy Efficiency*, vol. 14, no. 2, pp. 455-479, 2021.
15. M. Khmara et al., "Energy Efficiency in the Manufacturing Sector: A Global Perspective," *J. Ind. Ecol.*, vol. 25, no. 1, pp. 115-129, 2021.
16. M. Khoshrou et al., "Digital Transformation and Smart Energy Management Systems for Green Manufacturing," *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 3401-3415, 2022.
17. R. N. Stavins, "Energy-Efficiency and Climate Change Mitigation: Policy Options," *Nat. Energy*, vol. 7, pp. 290-301, 2022.
18. IEA, *Energy Efficiency 2020: Progress and Recommendations*, IEA, 2020.
19. C. A. Mejia et al., "Digitalization and Energy Efficiency in Manufacturing Systems," *J. Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 49, p. 100751, 2022.
20. G. P. Karunaratne and X. Li, "Energy Consumption in Hotels: A Comparative Study between Large and Small Hotels in Sri Lanka," *J. Cleaner Prod.*, vol. 238, p. 117910, 2019.
21. S. Becken, "Sustainable Tourism and Energy Efficiency: A Global Perspective," *J. Sustain. Tourism*, vol. 30, no. 4, pp. 641-656, 2022.
22. W. Xia et al., "Energy Performance Benchmarking in the Hospitality Sector: Insights from Hotels in Asia," *Energy Build.*, vol. 241, p. 110925, 2021.
23. C. Roberts et al., "Energy Efficiency in Buildings: A Review of Trends, Challenges, and Opportunities," *Build. Environ.*, vol. 207, p. 108506, 2022.
24. IEA, *Energy Efficiency 2021: Analysis and Policy Recommendations*, IEA, 2021.
25. R. Priyadarsini et al., "A Study on Energy Performance of Hotel Buildings in Singapore," *Energy Build.*, vol. 41, no. 12, pp. 1319-1324, 2009.
26. M. Honey and D. Krantz, "Sustainable Tourism and Climate Resilience: Challenges and Solutions for Cuba," *J. Sustain. Tourism*, vol. 28, no. 4, pp. 390-402, 2021.

Chitosan as a vehicle in slow-release systems: structure, function and application

Margarita G., Garcia-Barajas^a, Juan de Dios, Galindo-De-La-Rosa^a, Angélica, Feregrino-Perez^a, Alejandra, Álvarez-López^a, Vanesa, Vallejo-Becerra^a

^a División de Investigación y Posgrados, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro., México C.P. 76010

Keywords: BEN, urea, chitosan, slow-release, sustainability,

Abstract- Slow-release systems have been proposed in agriculture to mitigate environmental damage caused by fertilizer losses. Chitosan is a biodegradable, biocompatible and non-toxic material that has been used as a delivery vehicle. The use of chitosan with sodium tripolyphosphate allows the encapsulation of different compounds. Urea is a widely used fertilizer, but with high percentages of loss. The study carried out an encapsulation of 5% w/v urea with 3.5% w/v chitosan using sodium tripolyphosphate as a cross-linking agent. An encapsulation percentage of 36.7% and a rapid release of urea were obtained. The presence of urea decreases the free amino groups, considering it an interference in encapsulation.

1. Introduction

Chitosan is a naturally occurring polysaccharide found in the exoskeleton of crustaceans. It is characterized by being a biodegradable, biocompatible material with antimicrobial properties [1]. Chitosan comes from the partial deacetylation of chitin, and it is formed of glucosamine and N-acetylglucosamine [2]. The structure and properties of the material make chitosan a good candidate for drug delivery systems [3].

In the agricultural industry, chitosan has been used as a pesticide, but in the last years chitosan has been used in slow-release systems [4].

Slow-release systems consist of using materials that allow nutrients to be encapsulated or coated. The physical barrier added to nutrient allows the plant to have access to fertilizers for a long time [5].

Nitrogen is the most important nutrient in plants, it is part of the formation of proteins,

aminoacids, secondary metabolites and plant tissues. The supply of nitrogen to plants is for inorganic salts such as urea [6].

Urea is a fertilizer of easy use; it has a large range of pH in soils and provides 46% nitrogen. However, it is very soluble and goes through volatilization and leaching processes and for that reason it presents losses of around 40-70% [7]. The urea hydrolysis process is generating pollution in the aquifers, soils and air [8].

The objective of the work is evaluating a slow-release system of urea with chitosan. The structural properties of chitosan will be used to create networks with sodium tripolyphosphate. This system will reduce nitrogen losses generated by the rapid hydrolyzation of urea. The system Chitosan/Tripolyphosphate sodium/urea (Ch/TPP/Urea) will help to contribute to objective 13 of the 2030 agenda.

2. Methodology

The synthesis of the material was carried out by ionic gelation. 3.5% of chitosan and 5% of urea were solubilized in 0.1% acetic acid and pH 4.7. The solution was stirred for 24 hours and was subsequently filtered.

A solution 0.1% p/v of TPP was prepared and stored at 4°C. The TPP solution was added to the chitosan/urea solution with a flow rate of 1mlmin⁻¹. The synthesis was dried by lyophilization.

The encapsulation percentage was obtained with the formula:

$$\% E = \frac{Ww - Wd}{Ww} \times 100 \quad (1)$$

Where:

%E = encapsulation percentage

Ww= wet weight

Wd = dry weight

The release profile was run with 0.1g of Ch/TPP/Urea material immersed in 50 ml of phosphate buffer pH 7. After 0.125 ml of the enzyme solution (1mg of commercial Sigma Aldrich urease enzyme in 1 ml of phosphate buffer pH7) was added, subsequently 1ml aliquots were removed every 15 minutes for 2 hours. The 3ml aliquots were deposited in the Nessler (The Nessler reagent was prepared with 75 ml of commercial S.A. reagent) reagent and taken to the spectrophotometer at 480 nm.

Correction of absorbances by reagents and cell material was performed in a blank without urease.

The interferences of urea in the encapsulation process were determined with a potentiometric titration of the encapsulation supernatant with 1 M NaOH.

The inflection points of the potentiometric titration allow to know the percentage of protonated groups and are obtained with equation 2.

$$\% NH_2^+ = \frac{16.1 (y-x) f}{w} \quad (2)$$

Where:

Y=Mayor inflection point

X= Minor inflection point

f = Molarity of NaOH

w = sample weigh

16.1 = chitosan equivalent weight

3. Results and discussions

The protonation of the amino groups in an acidic medium gives chitosan a highly reactive character. The amino groups react by chemical cross-linking with the tripolyphosphoric ions, forming micelles (Figure 1) where the urea is trapped [9]

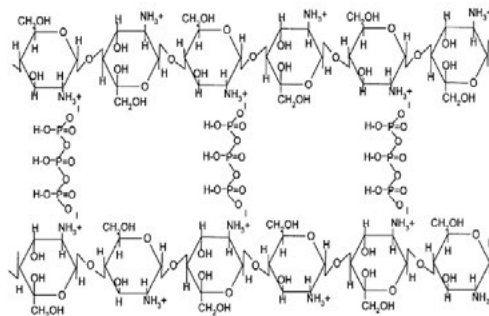


Fig 1. Ionic cross-linking between chitosan structure and TPP in acidic medium.

The percentage of encapsulation was carried out by weight difference and is observed in Table 1. The encapsulation percentage was 36% of urea, this value is below that reported with other methodologies [9].

Table 1. Dry weight (Wd) and wet weight (Ww) in grams and percentage of encapsulation (%E) of Ch/TPP/Urea material using Ec. 1.

Ww	Wd	%E
92.03	58.12	36.73%

The Ch/TPP/Urea material presented a favorable behavior (figure 2). The increase in urea in the aqueous medium with respect to time indicates that the physical barrier selected for the slow release system does not show any impediment to the release process, also in a period of 2 hours, no stability is shown in the graph, which allows to conclude that there is an increase in the permanence of the nutrient given that this period of time is necessary for a complete degradation of urea.

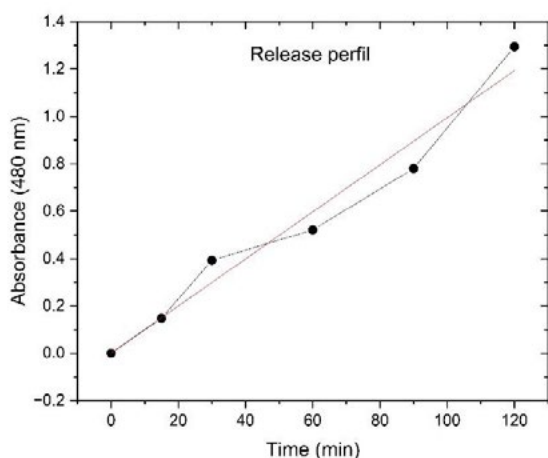


Fig 3. Urea release kinetics of Ch/TPP/Urea material with non-linear trend

The release trend does not follow a linear behavior, although the behavior indicates an increase in the release rate that is not desired.

Potentiometric titration evaluates the percentage of free amino groups present in chitosan.

The urea added to the matrix does not react with chitosan (Figure 4) since the percentage of acetylation is not modified in the presence and absence of urea.

Potentiometric titration with a base allows to observe two inflection points, which correspond to the protonation of the amino groups. The protonated amino groups correspond to the functional groups that were not cross-linked to the TPP. An alteration in the protonation of the amino groups indicates some interaction of the amino groups with urea.

Table 2 shows that chitosan with urea has a lower number of protonated amino groups, indicating that the concentration of urea is a factor that intervenes in the encapsulation process.

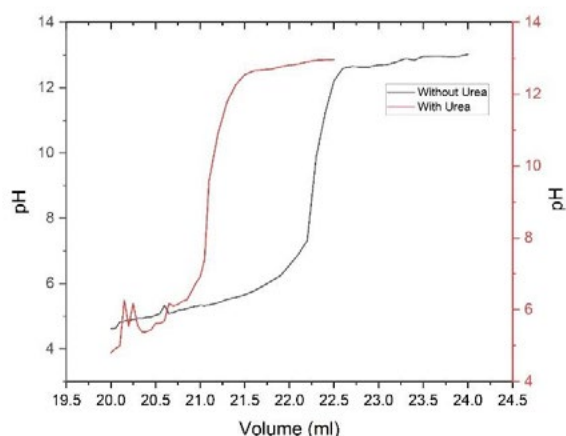


Fig 4. Titration curve of chitosan with NaOH with urea and without urea.

Table 2. Critical values and percentage of protonation of amino groups for a 0.3g sample of chitosan with and without urea

	With Urea	Without Urea
X	20.85 ml	21.5 %
y	21.60 ml	22.6 %
% NH ₂ ⁺	40.25 %	59.0 %

3. Conclusions

Chitosan is a potential matrix for urea entrapment because it can retain a significant percentage and release it gradually.

The experimental development of the study functions as exploratory tests to improve the efficiency of a slow-release system made with chitosan, TPP and urea.

Acknowledgment

The first author gratefully acknowledges Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) for the financial support granted to carry out my PHD studies.

References

- [1] Wang, J., & Zhuang, S. (2022). Chitosan-based materials: Preparation, modification and application. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131825.
- [2] Sivashankari, P. R., & Prabakaran, M. (2017). Deacetylation modification techniques of chitin and chitosan. In *Chitosan Based Biomaterials Volume 1* (pp. 117-133). Woodhead Publishing.
- [3] Omer, A. M., Ziora, Z. M., Tamer, T. M., Khalifa, R. E., Hassan, M. A., Mohy-Eldin, M. S., & Blaskovich, M. A. (2021). Formulation of quaternized aminated chitosan nanoparticles for efficient encapsulation and slow release of curcumin. *Molecules*, 26(2), 449.
- [4] Eddarai, E. M., El Mouzahim, M., Boussen, R., Bellaouchou, A., Guenbour, A., & Zarrouk, A. (2022). Chitosan-kaolinite clay composite as durable coating material for slow release NPK fertilizer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 195, 424-432.
- [5] Lakshani, N., Wijerathne, H. S., Sandaruwan, C., Kottegoda, N., & Karunarathne, V. (2023). Release Kinetic Models and Release Mechanisms of Controlled-Release and Slow-Release Fertilizers. *ACS Agricultural Science & Technology*, 3(11), 939-956.
- [6] Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., & Missaoui, A. (2020). Current progress in nitrogen fixing plants and microbiomresearch. *Plants*, 9(1), 97.
- [7] Beig, B., Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Hussain, A., Zia, M. H., & Mehran, M. T. (2020). Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: A review. *Journal of plant nutrition*, 43(10), 1510-1533.
- [8] Tapia-Hernández, J. A., Madera-Santana, T. J., Rodríguez-Félix, F., & Barreras-Urbina, C. G. (2022). Controlled and Prolonged Release Systems of Urea from Micro-and Nanomaterials as an Alternative for Developing a Sustainable Agriculture: A Review. *Journal of Nanomaterials*, 2022(1), 5697803.
- [9] Hussain, M. R., Devi, R. R., & Maji, T. K. (2012). Controlled release of urea from chitosan microspheres prepared by emulsification and cross-linking method. *Iranian Polymer Journal*, 21, 473-479.

Identificación de fitoquímicos de interés terapéutico en *Tradescantia zebrina* para su incorporación a nanopartículas de quitosano.

Phytochemicals' identification of therapeutic interest in *Tradescantia zebrina* for their incorporation into chitosan nanoparticles.

Valencia-Gil, M. Elvira¹, Ferreira-García, Ma. Guadalupe¹, Estévez-González, Miriam²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

²Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México.

Corresponding author: maria.ferreira@uaq.mx

Palabras clave: NAN, fitoquímicos, extractos naturales, nanopartículas, quitosano, leucemia.

Resumen: Este artículo presenta los resultados preliminares del desarrollo de un hidrogel que actúe como vehículo de administración de nanopartículas de quitosano cargadas con extracto natural de *Tradescantia zebrina*. Se enfatiza la identificación positiva de fitoquímicos como flavononas, un tipo de flavonoide y esteroides. Estos son compuestos naturales que pueden llegar a tener efectos positivos en la salud, en este caso, la *Tradescantia zebrina* promete ser de utilidad gracias a sus efectos antibacteriales y anticancerígenos, los extractos de esta planta fueron obtenidos mediante maceración en disolvente polar al cual se le realizaron las 3 pruebas de identificación de fitoesteroides y flavonoides resultando positivas. Estos compuestos pueden ser encapsulados en nanopartículas de quitosano por su biocompatibilidad, lo que permitiría una liberación controlada y dirigida de los principios activos de interés, posiblemente mejorando la eficacia del tratamiento, y ayudando a reducir efectos secundarios asociados a la quimioterapia tradicional. Este estudio presenta resultados preliminares que sugieren que el uso de un extracto natural con fitoquímicos con potenciales características antibacterianas y anticancerígenas podría ofrecer una nueva y prometedora vía de tratamiento para la leucemia, abriendo posibilidades para tratamientos coadyuvantes más seguros y efectivos para los pacientes más jóvenes.

Keywords: NAN, phytochemicals, natural extracts, nanoparticles, chitosan, leukemia.

Abstract- This article presents the preliminary results of the development of a hydrogel that acts as a delivery vehicle for chitosan nanoparticles loaded with natural extract of *Tradescantia zebrina*. Emphasis is placed on the positive identification of phytochemicals such as flavonones, a type of flavonoid, and sterols. These are natural compounds that can have positive effects on health. In this case, *Tradescantia zebrina* promises to be useful thanks to its antibacterial and anticancer effects. The extracts of this plant were obtained by maceration in a polar solvent to which the 3 tests for the identification of phytosterols and flavonoids were performed, resulting positive. These compounds can be encapsulated in chitosan nanoparticles due to their biocompatibility, which would allow a controlled and targeted release of the active ingredients of interest, possibly improving the efficacy of the treatment, and helping to reduce side effects associated with traditional chemotherapy. This study presents preliminary results suggesting that the use of a natural extract containing phytochemicals with potential antibacterial and anticancer properties could offer a promising new

treatment avenue for leukemia, opening possibilities for safer and more effective adjuvant treatments for younger patients.

1. Introducción

Durante la última década, el avance en el desarrollo de biomateriales, en particular los hidrogeles como dispositivos de transporte o medios de administración de medicamentos, ha despertado el interés en el avance y crecimiento de terapias alternativas contra el cáncer [1]. Una ventaja de utilizar hidrogeles es que estos permiten una matriz con mayor biodisponibilidad.

Los biopolímeros, como las nanopartículas de quitosano formadas a partir de polisacáridos como la quitina, exhiben una combinación de propiedades fisicoquímicas y biológicas que las hacen atractivas en la ingeniería y el diseño de materiales esenciales en las ciencias de la salud. La terapia dirigida ha adoptado materiales innovadores debido a su superficie modificable, síntesis verde, alta biocompatibilidad y capacidad para encapsular compuestos bioactivos [2].

El uso de nanopartículas de quitosano cargadas con extractos naturales se presenta como una innovadora área de investigación. Además, se ha demostrado que los extractos naturales poseen distintas propiedades terapéuticas de interés, y representan una alternativa natural a los fármacos o tratamientos en diversas enfermedades.

Las propiedades de la *Tradescantia zebrina*, conocida por sus aplicaciones antibacterianas, anticancerígenas, antialérgicas, fueron descritas en un estudio de 2023 realizado por Sebastián Alberto Ramos-a, Sugely López-Martínez, et al. La utilización de extractos naturales es una técnica viable para mejorar el valor terapéutico de los hidrogeles de alginato y las nanopartículas de quitosano [3].

El presente trabajo investiga los fitoquímicos presentes en el extracto de la *Tradescantia zebrina* como resultados preliminares en la creación de un biomaterial que pueda ser útil en el tratamiento de la leucemia linfoblástica aguda. Se utilizó la síntesis verde utilizando tripolifosfato pentasódico (TPP) para crear nanopartículas, que se usan comúnmente debido a su capacidad para retener partículas pequeñas, y resultan ideales para la encapsulación con tamaños entre 100 y 300 nm [4]. Los extractos se crearán en solventes de diferentes polaridades y la concentración de los componentes puede diferir según el solvente utilizado [5]. Luego, estos estarán sujetos a análisis cromatográficos para determinar que fitoquímicos están presentes y compararlos con los reportados en la literatura [6]. Alternativamente, el hidrogel y las nanopartículas se pueden caracterizar usando microscopía TEM o SEM, potencial Z u otras técnicas, como dispersión de rayos X, dependiendo de la disponibilidad del equipo.

De igual manera, se discutirá el potencial del uso de extractos naturales como posible coadyuvante para tratar la leucemia linfoblástica infantil. Esta enfermedad es un grupo de entidades oncohematológicas de rápido desarrollo que muestran un crecimiento descontrolado de glóbulos blancos embrionarios en la médula ósea y la sangre [7]. Esto quiere decir que la médula ósea produce demasiados linfocitos inmaduros [8].

La capacidad de biomateriales como lo son los hidrogeles y nanopartículas para ser una fuente continua de liberación de fármacos y como andamios para la regeneración celular es una característica única que los ha convertido en una tendencia de investigación en materiales. Estos biomateriales se caracterizan por su alta biocompatibilidad, su capacidad para retener agua y su facilidad de modificación química. El desarrollo de hidrogeles de alginato como

tratamientos coadyuvantes para la leucemia es un desarrollo relativamente nuevo pero prometedor [9]. El objetivo final del proyecto es determinar la viabilidad del uso de hidrogeles de alginato para transportar nanopartículas de quitosano infundidas con extractos naturales.

Además, los últimos descubrimientos en el tratamiento de la leucemia han demostrado que el uso de grupos de ácido succínico en nanopartículas de quitosano puede mejorar su eficacia [10]. Esto sirve como base para el uso del extracto de *Tradescantia zebrina*, ya que se ha demostrado que contiene ácido succínico [11], junto con otros fitoquímicos farmacológicamente relevantes.

2. Metodología

2.1. Extracto de *Tradescantia zebrina*

Primeramente, la planta fue identificada por el Herbario de Querétaro “Dr. Jerzy Rzedowski” (QMEX), confirmando que se trata de la especie *Tradescantia zebrina*, la cual ingresó a su colección con el número QMEX00002651.

Para realizar el extracto se lavó y se dejó secar a temperatura ambiente. Una vez seca la planta se llevó a polvo con la ayuda de un molino y una malla tamizadora para homogeneizar el tamaño de grano.

Para la obtención del extracto se realizó mediante maceración, agregando 5gr de polvo tamizado en etanol por 72 hrs con agitación constante. Se pretende realizar la maceración con distintos tipos de solvente como lo son el acetato de etilo, acetona y metanol con el objetivo de determinar el de mayor concentración de compuestos fitoquímicos.

Para la identificación de los compuestos fitoquímicos se realizaron tres pruebas: Prueba

de Shinoda, Prueba de Liebermann-Buchard y Prueba de Salkowski.

2.2. Nanopartículas de quitosano (QNPs)

Se prepararon por el método gelación iónica usando como agente reticulante el tripolifosfato pentasódico (TPP).

Primeramente, se realizó una disolución ácida para el quitosano con ácido acético 1:10, de ahí se tomó una alícuota y se llevó a una disolución 3:50. En esta solución final se disolvió gradualmente el quitosano hasta obtener una solución translúcida.

Para el agente entrecruzante, se utilizaron dos concentraciones de TPP, una al 0.1% y otra al 0.2%, esto con el objetivo de identificar la óptima para una buena encapsulación del extracto [3].

3. Resultados preliminares y discusión

El extracto obtenido mediante la maceración con etanol arrojó resultados favorables mediante las pruebas de identificación realizadas.

Primeramente, para la prueba de Shinoda (Fig. 1) el resultado positivo a flavonoides es si la solución se torna en un color rojo intenso, cabe señalar que si aparece otro color como anaranjado, verde o azul es indicativo de que puede haber presencia de flavonas,

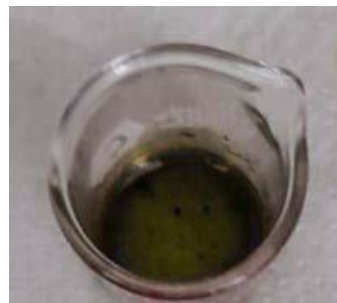


Figura 1. Prueba positiva de Shinoda al extracto etanólico.

flavononas, flavonoles, flavononoles o xantonas.

Como se puede observar en la Figura 1, se observa una coloración verdosa, lo cual resulta en un indicativo positivo a flavonas, las cuales son un tipo de flavonoide que presenta características antibacterianas y anticancerígenas.

Posteriormente, en la prueba de Liebermann-Buchard se considera positivo a fitoesteroles cuando el extracto analizado vira a color azul o anaranjado oscuro. De acuerdo a la Figura 2 el extracto etanólico contiene fitoesteroles.



Figura 2. Prueba positiva de Liebermann-Buchard al extracto etanólico.

Finalmente se realizó la prueba de Salkowski, esta se realiza para la identificación de esteroides y metilesteroides, en donde se debe observar un viraje de color hacia el amarillo o rojo en la presencia de estos compuestos, como en la Figura 3.



Figura 3. Prueba positiva de Salkowski al extracto etanólico.

Ahora bien, gracias a la metodología empleada y al constante estudio de las nanopartículas de quitosano se puede suponer su buena estabilidad mediante coloración y consistencia las cuales coinciden con una coloración translúcida y consistencia viscosa pero no gelosa [3], resultados que son señal de un buen entrecruzamiento y formación de tamaño para encapsulación.

Como objetivos posteriores y de acuerdo a la literatura se ha encontrado que el método más eficaz de encapsulación es realizar la incorporación en la solución ácida [3]. El hecho de realizar primero una síntesis de nanopartículas permite analizarlas de primera mano para saber si estas cumplen con las condiciones de tamaño y estructura óptimas para la incorporación de extractos.

4. Conclusiones

Se logró comprobar que la planta en estudio, *Tradescantia zebrina* contiene fitoquímicos con potenciales aplicaciones anticancerígenas como lo son los flavonoides, fitoesteroides y metilesteroides. Cabe resaltar que es necesario realizar estudios complementarios con solventes de diferentes polaridades para evaluar la acción de estos en la concentración de estos fitoquímicos.

El tamaño de las nanopartículas se encuentra en análisis, sin embargo, de acuerdo a la metodología utilizada, la cuál ya se encuentra estandarizada se espera obtener tamaños entre 100 y 300 nm, los cuales resultan óptimos para la inclusión de extractos o de fármacos.

Agradecimientos

La autora agradece al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA)

por proporcionar las instalaciones y el equipo para llevar a cabo este proyecto. A la Universidad Autónoma de Querétaro y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgar los recursos necesarios para realizar esta investigación.

Referencias

- [1]. Obrique, Natalia, et al. (2020). Desarrollo de Nuevos Hidrogeles Para Aplicaciones Biomédicas Tesis Doctoral UDC.
- [2]. Carmona, E. R., Plaza, T., Recio-Sánchez, G., & Parodi, J. (2018). Generación de un protocolo para la síntesis de nanopartículas de quitosano cargadas con florfenicol a través del método de gelación iónica. *Revista de Investigaciones Veterinarias Del Perú*, 29(4), 1195–1202. <https://doi.org/10.15381/rivep.v29i4.15203>
- [3]. Ramos-Arcos, S. A., López-Martínez, S., Velázquez-Martínez, J. R., Gómez-Aguirre, Y. A., Cabañas-García, E., Morales-Bautista, C. M., & Hernandez-Gallegos, M. A. (2023). Phytochemicals and bioactivities of *Tradescantia zebrina* bosse: a southern mexican species with medicinal properties. *Journal of Food and Nutrition Research*, 11(9), 564–572.
- [4]. Vyas, Ruchi. (2016). Nanobiomaterials in Cancer Therapy || Chitosan nanoparticles for efficient and targeted delivery of anticancer drugs. 281–306. doi:10.1016/B978-0-323-42863-7.00009-8
- [5]. Butnariu, M., Quispe, C., Herrera-Bravo, J., Fernández-Ochoa, Á., Emamzadeh-Yazdi, S., Adetunji, C. O., Memudu, A. E., Otlewska, A., et al. (2022). A Review on *Tradescantia*: Phytochemical Constituents, Biological Activities and Health-Promoting Effects. *Frontiers in Bioscience - Landmark*, 27(6). <https://doi.org/10.31083/j.fbl2706197>
- [6]. Tan JBL, Yap WJ, Tan SY, Lim YY, Lee SM. Antioxidant Content, Antioxidant Activity, and Antibacterial Activity of Five Plants from the Commelinaceae Family. *Antioxidants*. 2016; 3:758–769.
- [7]. Jiménez Jarava, O. (2019). Preparación y caracterización de nanopartículas de quitosano modificado para la encapsulación de polifenoles con potencial aplicación en el tratamiento de leucemia. Universidad de Antioquia.
- [8]. Valencia-González M, Nájera-Castillo MF, Tejocote-Romero I, Trujillo-Condes VE. (2021). Factores etiológicos de la leucemia linfoblástica aguda infantil. *Hematol Méx*. 22 (3): 155-161.
- [9]. Desarrollo de nano y micropartículas basadas en hidrogeles: evaluación como sistemas de transporte/liberación controlada de fármacos. Trabajo Fin de Máster. (n.d.). Recuperado el 3 de mayo 2024, de: https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/64241/TFM_CarmenFernandezAlvarez.pdf?sequence=4
- [10]. Ahmad, M. Z., Rizwanullah, Md., Ahmad, J., Alasmay, M. Y., Akhter, Md. H., Abdel-Wahab, B. A., ... Haque, A. (2021). Progress in nanomedicine-based drug delivery in designing of chitosan nanoparticles for cancer therapy. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 71(8), 602–623. <https://doi.org/10.1080/00914037.2020.1869737>
- [11]. Butnariu, M., Quispe, C., Herrera-Bravo, J., Fernández-Ochoa, Á., Emamzadeh-Yazdi, et al. (2022). A Review on *Tradescantia*: Phytochemical Constituents, Biological Activities and Health-Promoting Effects. *Frontiers in*



Bioscience - Landmark, 27(6).
<https://doi.org/10.31083/j.fbl2706197>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Clasificación automática de pacientes con COVID19 mediante procesamiento de imágenes radiográficas: comparativa de modelos IA

Automatic classification of COVID-19 patients using radiographic image processing: comparison of AI models

Velasco Cerros Rafael Eduardo¹, Amézquita Sánchez Juan Pablo¹, Jaramillo Quintanar Daniel^{1*}
División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería¹
Universidad Autónoma de Querétaro
Santiago de Querétaro, Querétaro, México
*rvelasco25@alumnos.uaq.mx, daniel.jaramillo@uaq.mx**

Palabras clave: MEC; clasificación automática; procesamiento de imágenes; aprendizaje automático; K vecinos más cercanos; redes neuronales convolucionales.

Resumen- El COVID-19 es una enfermedad respiratoria contagiosa que afecta a millones de personas en el mundo entero y que puede causar desde síntomas leves como fiebre y tos, hasta problemas graves como neumonía, dificultad respiratoria y problemas cardiovasculares. Dada la importancia de un diagnóstico temprano y preciso, es crucial desarrollar tecnologías que apoyen a los científicos y especialistas en este proceso. El presente trabajo propone una metodología basada en el análisis de imágenes radiográficas pulmonares de pacientes con covid y sanos, la cual utiliza algoritmos clasificadores inteligentes de Machine Learning (K vecinos más cercanos, KNN) y Deep Learning (redes neuronales convolucionales, CNN), incluyendo el preprocesamiento de imágenes para optimizar su calidad y poder realizar su clasificación automática. Esta metodología se enfoca en realizar una exhaustiva comparativa entre ambos modelos, utilizando los mismos procesamiento de imagen para los dos casos, lo que garantiza una evaluación justa. Los modelos se entrenan y validan mediante la técnica de validación cruzada, a fin de mejorar la generalización y reducir el riesgo por sobre ajuste. Para medir y comparar los rendimientos, se emplean matrices de confusión y métricas de desempeño como la exactitud, precisión, recall y F1-Score.

Keywords: MEC; automatic classification; image processing; machine learning; K nearest neighbors; convolutional neural networks.

Abstract- COVID-19 is a contagious respiratory disease that affects millions of people worldwide and can cause symptoms ranging from mild fever and cough to severe problems such as pneumonia, respiratory distress, and cardiovascular problems. Given the importance of an early and accurate diagnosis, it is crucial to develop technologies that support scientists and specialists in this process. This work proposes a methodology based on the analysis of lung radiographic images of patients with COVID and healthy patients, which uses intelligent Machine Learning (K nearest neighbors, KNN) and Deep Learning (convolutional neural networks, CNN) classifier algorithms, including image preprocessing to optimize their quality and perform automatic classification. This methodology focuses on performing an exhaustive comparison between both models, using the same image processing for both cases, which guarantees a fair evaluation. The models are trained and validated using the cross-validation technique, in order to improve generalization and reduce the risk of overfitting. To measure and compare performance, confusion matrices and performance metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-Score are used to measure and compare performance.

1. Introducción

El COVID-19 es una enfermedad que ha afectado a millones de personas en el mundo, los primeros casos se reportaron en diciembre de 2019 en Wuhan, China [1]. Desde entonces, la cantidad de contagios ha aumentado exponencialmente. Para enero de 2024, se han confirmado cerca de 775 millones de casos globalmente [2]. Actualmente, se dispone de diversa información sobre este virus, incluyendo su fisiopatología y manejo. Se sabe que además de causar problemas respiratorios, a menudo afecta el sistema digestivo, el neurológico y el cardiovascular [1,3]. La pandemia de COVID-19 resalta la importancia del diagnóstico rápido de enfermedades respiratorias. En este sentido, el uso de imágenes médicas, como lo son radiografías (RX) y tomografías (TC) de pulmones, junto con algoritmos de inteligencia artificial (IA), podría ser una alternativa clave para detectar estas complicaciones de manera precisa y eficiente, mejorando la gestión de la enfermedad y optimizando los tratamientos.

Ante la necesidad de desarrollar nuevos métodos de diagnóstico, se han explorado nuevas tecnologías haciendo uso de la IA y el procesamiento de imágenes. En los últimos años, el uso de Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL) ha sido ampliamente usado para la detección de enfermedades en los humanos, las técnicas de ML brindan una oportunidad especial para conseguir herramientas que mejoran la detección temprana de enfermedades, ayudan a deducir su pronóstico, y permitan en definitiva avanzar en la medicina personalizada [4]. Los principales modelos predictivos de aprendizaje automático aplicado en medicina han sido: redes neuronales convolucionales (CNN en inglés), support vector machine (SVM), árboles de decisión, regresiones lineales, K vecinos más cercanos (KNN en

inglés), entre otros [5]. Por otro lado, el uso de imágenes médicas de los pulmones presenta valiosa información, la cual es usada por los especialistas [6], pudiendo brindar un diagnóstico temprano y el tratamiento oportuno ante casos de COVID-19 [7]. En este contexto, Estrada et al. [8] desarrollaron una herramienta para la detección automática de lesiones de pulmón (leve, grave y moderada) en pacientes (px) con COVID-19, a través de procesamiento de imágenes TC de tórax. Por otro lado, diversas investigaciones se han enfocado al uso de aprendizaje automático como KNN y SVM para resolver las dificultades de COVID-19 [9]. Por ejemplo, Atta-ur-Rahman et al. [10] propusieron un método basado en el uso de SVM y una gran base de datos con información como: fiebre, dolor de pecho y cabeza, dificultad para respirar, gripe y tos, para identificación de px con COVID-19. También se han usado modelos CNN para detectar esta enfermedad, ya que son los más comunes en DL y permiten emitir diagnósticos rápidos de casos positivos de COVID-19 [11,12]. De esta manera, Aslan et al. [13] propusieron un método de clasificación de px con COVID-19 usando TC de pulmones y CNN.

A pesar de los avances tecnológicos en el diagnóstico de COVID-19, diversos estudios resaltan la necesidad de desarrollar nuevos modelos que mejoren la clasificación y ofrezcan herramientas más efectivas para los especialistas [4,14]. Por ello, en este trabajo se propone una novedosa metodología, la cual evalúa y compara modelos KNN y CNN ante el mismo preprocesamiento de imágenes RX de tórax para ambos, lo cual involucra conversión de imágenes a escala de grises, ecualización por histograma, un par de filtros (gaussiano y de mediana) y rotación. Esto garantiza que las condiciones de entrada para ambos modelos sean idénticas, permitiendo una evaluación justa y precisa entre sí. Asimismo, se utiliza entrenamiento y

validación cruzada para asegurar la robustez del análisis. Este tipo de comparación detallada entre ambos modelos, junto con la clasificación automática mediante el algoritmo KNN aplicado a la base de datos utilizada, no ha sido explorado previamente y tiene el potencial de aportar nuevas perspectivas en el diagnóstico médico.

2. Metodología

La Fig. 1 presenta el diagrama de flujo de la metodología propuesta, esta se conforma principalmente por las siguientes cuatro etapas: (i) base de datos (imágenes RX de px con y sin COVID-19), (ii) preprocesamiento de imágenes RX, (iii) algoritmos inteligentes IA (KNN y CNN) y (iv) resultados, las cuales se explican a detalle más adelante.

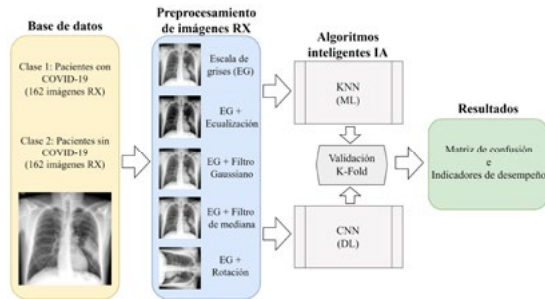


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

2.1. Base de datos

Este trabajo utiliza una base de datos que incluye una colección de RX de tórax recopiladas durante la pandemia de COVID-19, abarcando tanto casos positivos como negativos de diversos px. El conjunto de datos tiene como objetivo permitir un examen detallado de sus características, ya que se arroja luz sobre los patrones radiológicos distintivos de la infección por COVID-19 [15].

La base fue descargada de Kaggle [15] y contiene $n = 324$ imágenes: 162 de px con COVID-19 y 162 de px sanos, todas de 224x224 píxeles en formato JPG.

2.2. Preprocesamiento de imágenes

Para optimizar el manejo de los datos para su almacenamiento, transmisión y extracción de información, se aplicaron varios preprocesamientos a las imágenes de la base de datos.

Primeramente, se transformaron las imágenes originales RX a escala de grises, mediante la Ec. (1) [16].

$$I_{gris} = 0.298 * I_R + 0.587 * I_G + 0.114 * I_B \quad (1)$$

donde I_{gris} es la intensidad en escala de grises e I_R , I_G y I_B son las intensidades en color rojo, verde y azul respectivamente de la imagen RX a lo largo de todos sus píxeles. Con esto, se reduce el costo computacional, al solo tener que procesar un canal (gris) en lugar de los tres (RGB) de una imagen a todo color.

También se realizó ecualización de histograma mediante la Ec. (2)[17], a fin de mejorar el contraste.

$$S_k = \frac{(L-1)}{MN} \sum_{j=0}^k n_j \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (2)$$

aquí, S_k es el valor acumulativo del nivel de gris k ; L el total de niveles de gris; M y N las dimensiones de la imagen y n_j los píxeles. Adicionalmente, se aplicó un filtrado gaussiano siguiendo la Ec. (3)[17] y un filtrado de mediana Ec. (4), con el fin de obtener imágenes con menor ruido, manteniendo las características principales de ellas.

$$G_{(s,t)} = K_e \frac{s^2 + t^2}{2\sigma^2} \quad (3)$$

donde $G_{(s,t)}$ es el valor del filtro gaussiano en las coordenadas (s, t) ; K_e un factor de normalización y σ la desviación estándar que determina el nivel de desenfoque.

$$I_{med}(i, j) = mediana(N_{ij}) \quad (4)$$

en esta ecuación, N_{ij} representa el conjunto de valores de intensidad en el vecindario del píxel (i, j) .

Por último, se realizó la rotación de 90° y el reescalado de las imágenes, desde 160x160 hasta 20x20 píxeles. Todos los preprocesamientos de imagen expuestos, se realizaron utilizando el software Python y la librería OpenCV [18]. El objetivo de esto fue crear distintos escenarios de entrada para los algoritmos KNN y CNN utilizados, tratando de mantener las características de las imágenes y reducir el ruido en ellas, para posteriormente compararlos y obtener a los mejores modelos.

2.3. Algoritmos inteligentes IA

Se implementaron en software (Python) dos clasificadores: 1) simple KNN, un algoritmo de ML que clasifica imágenes según la similitud de píxeles [19], utilizando la librería OpenCV [18], y 2) CNN, un modelo de DL que extrae automáticamente características relevantes mediante convoluciones para su clasificación [23], haciendo uso de la librería TensorFlow [19] en el software Python.

2.3.1. Simple KNN modelo ML

Se implementó un clasificador K vecinos más cercanos (Simple K-NN) [20-22], tomando en cuenta la distancia euclidiana E_c (5) entre la muestra de prueba y las muestras de entrenamiento, siguiendo la estructura que se muestra en la Fig. 2.

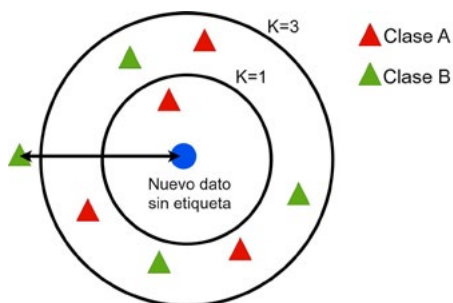


Figura 2. Estructura de un Simple KNN.

$$Dist_{euclidiana} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (5)$$

donde x_i, y_i son los componentes i -ésimos de los puntos x, y y n el número de características.

2.3.2. CNN modelo DL

Se implementó un clasificador que sigue la arquitectura mostrada en la Fig. 3 (CNN) [23-24], utilizando diferentes valores de configuración, con el objetivo de obtener la arquitectura CNN más óptima de entre las evaluadas.

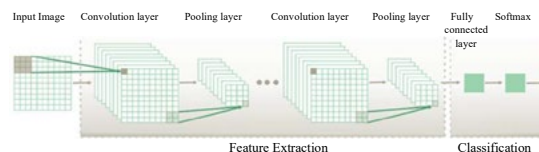


Figura 3. Arquitectura CNN.

2.4. Entrenamiento y evaluación K-Fold

La técnica de validación cruzada K-Fold se usó para entrenar y evaluar ambos algoritmos clasificadores de IA, con el fin de mejorar la generalización y reducir el riesgo por sobre ajuste. Esta técnica divide el conjunto de datos en k subconjuntos (folds), donde en cada iteración uno de los subconjuntos se usa para validación y los $k-1$ restantes para entrenamiento, garantizando que todos los datos participen tanto en validación como en entrenamiento [25].

3. Resultados y discusión

Esta sección presenta los resultados principales de la metodología propuesta, que incluye el preprocesamiento de las imágenes RX originales, la creación y evaluación de los modelos KNN y CNN mediante validación cruzada, una comparación de los resultados obtenidos y la discusión de los mismos.

3.1. Preprocesamiento de imágenes RX

La Fig. 4 presenta los preprocesamientos de imagen aplicados, (4a) muestra la RX original, (4b) corresponde a la misma imagen, pero en escala de grises. De igual manera, (4c-f) representan los resultados de aplicar ecualización por histograma, filtro gaussiano, filtro de mediana y rotación de 90° respectivamente a la imagen (4b). Para el filtrado gaussiano y de mediana se utilizó un vecindario de 3x3 píxeles para ambos.

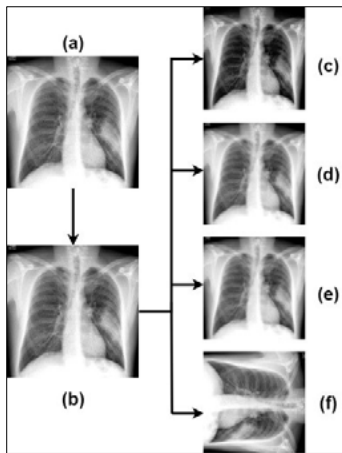


Figura 4. Preprocesamientos de imagen.

El preprocesamiento genera cinco tipos diferentes de imágenes (4b-f), las cuales son evaluadas utilizando los modelos KNN y CNN.

3.2. Clasificador simple KNN y CNN

Para evaluar el rendimiento de los modelos KNN y CNN, se utilizó la validación cruzada con k-fold=6. El conjunto de datos se dividió en seis particiones aleatorias, usando cinco para entrenamiento y una para validación por cada k-fold, lo que representa 270 imágenes para entrenamiento y 54 para validación en cada simulación. Los resultados de estas evaluaciones se muestran en promedio de los 6 k-folds para cada caso.

3.2.1. Modelo simple KNN

El modelo simple KNN se configuró con un valor de k vecinos igual a 3, en base a que represento mejores resultados ante varias simulaciones, los resultados de las diferentes pruebas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparativa de exactitudes promedio para el mejor modelo KNN.

	Escala de grises (EG)	EG + Ecualización	EG + Filtro gaussiano	EG + Filtro de mediana	EG + Rotación 90°
224x224	88.59%	82.10%	89.83%	89.88%	89.21%
160x160	90.12%	81.17%	90.14%	91.36%	90.13%
80x80	89.81%	83.35%	88.89%	90.45%	90.44%
40x40	89.52%	79.92%	87.34%	88.89%	89.50%
20x20	85.20%	75.93%	85.80%	85.19%	86.41%

En base a la Tabla 1, se observa que el mejor modelo KNN (celda verde) fue para la prueba donde se usó las imágenes RX con los procesamientos de reescalado de imagen de 160x160 píxeles más conversión a escala de grises más la aplicación del filtro de mediana, obteniendo una exactitud de 91.36%. Para este caso se muestra su matriz de confusión y los indicadores de desempeño en la Fig. 5, ambos en promedio de los 6 k-folds.

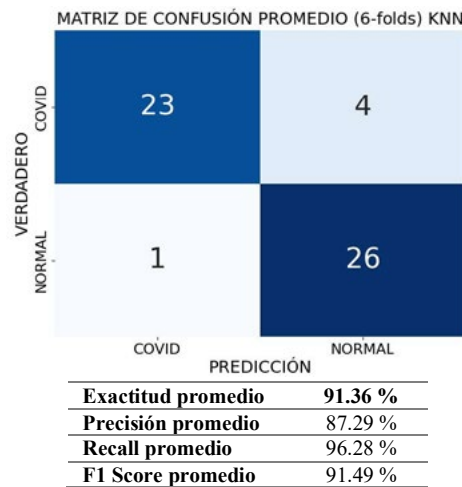


Figura 5. Matriz de confusión e indicadores de desempeño para el mejor modelo KNN.

3.2.2. Modelo CNN

A fin de obtener un modelo óptimo de CNN, esta etapa se dividió en dos experimentos. El primero (a), obtuvo la mejor entrada de procesamiento de imágenes ante una misma configuración inicial de arquitectura CNN (Tabla 2). Y el segundo experimento (b), consiguió una configuración más óptima que la arquitectura CNN inicial, ante la mejor entrada de imágenes procesadas obtenidas del experimento uno.

Tabla 2. Configuración inicial modelo CNN.

Tamaño de filtro	4x4
Número de filtros	8
Número de muestra (BS)	10
Número de épocas	10

(a) Primer experimento CNN

Se estableció la configuración inicial de arquitectura de la CNN como se muestra en

la Tabla 2. Al igual que el modelo KNN se realizaron varias pruebas en base a las distintas imágenes procesadas de entrada, obteniendo los resultados de la Tabla 3.

Tabla 3. Comparativa de exactitudes promedio para el mejor modelo CNN inicial.

	Escala de grises (EG)	EG + Ecuilización	EG + Filtro gaussiano	EG + Filtro de mediana	EG + Rotación 90°
224x224	69.75%	69.75%	68.83%	70.68%	69.14%
160x160	71.91%	73.40%	71.30%	76.54%	70.68%
80x80	59.88%	61.11%	70.06%	62.34%	52.72%
40x40	54.01%	56.48%	54.32%	54.63%	51.85%
20x20	52.16%	48.77%	50.31%	50.88%	50.88%

De acuerdo a la Tabla 3 se obtuvo la mayor exactitud (celda verde) para la prueba donde se aplicó los procesamiento de reescalado de imagen a 160x160 píxeles más conversión a escala de grises más la aplicación del filtro de mediana, obteniendo una exactitud de 76.54%. La matriz de confusión y los indicadores de desempeño para este modelo se muestran en la Fig. 6.

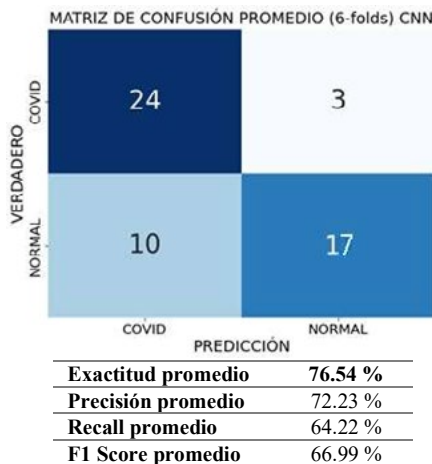


Figura 6. Matriz de confusión e indicadores de desempeño para el mejor modelo de CNN inicial.

Según los resultados de las Tablas 1-3, el modelo KNN mostró mayor exactitud, lo que se atribuye a su simplicidad y robustez ante las transformaciones de imagen. En cambio, el modelo CNN requiere imágenes de mayor calidad y resolución para extraer características complejas y aprender de ellas de manera efectiva, lo que lo hace más susceptible a la degradación del rendimiento

ante cambios en el preprocesamiento y el reescalado. Además, el número de imágenes ($n = 324$) favorece al modelo KNN.

(b) Segundo experimento CNN

Las imágenes con mejor procesamiento obtenidas en el primer experimento (160x160 + escala de grises + filtro de mediana), se utilizaron en este apartado, además, se tomó la configuración inicial de arquitectura CNN (Tabla 2) y se modificaron uno a uno los parámetros de configuración como se muestra en la Tabla 4, obteniendo el mejor en cada prueba y manteniéndolo para el resto de las configuraciones. Esto a fin de obtener un modelo CNN más óptimo. Los resultados se muestran en la Fig. 7.

Tabla 4. Diferentes configuraciones para la arquitectura CNN.

Tamaño de filtro	3x3	4x4	5x5	6x6
Número de filtros	4	8	16	32
Número de muestra (BS)	10	20	40	80
Número de épocas	5	10	20	40

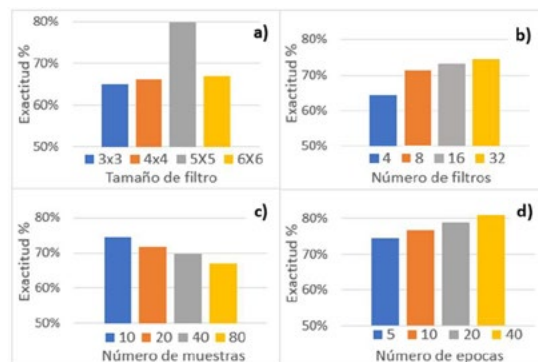


Figura 7. Exactitudes del modelo CNN ante diferentes configuraciones de arquitectura.

En base a la Fig. 7 el modelo CNN con la mejor configuración que se obtuvo fue la siguiente: tamaño de filtro: 5x5 (a), número de filtros: 32 (b), número de muestras: 10 (c) y número de épocas: 40 (d), logrando alcanzar una exactitud del modelo CNN del 80.25%. Para este caso se muestra su matriz de confusión y los indicadores de desempeño en la Fig. 8.



Figura 8. Matriz de confusión e indicadores de desempeño para el mejor modelo CNN.

En base a los resultados obtenidos, el modelo KNN superó al CNN en la clasificación de imágenes RX de pacientes con COVID-19 y sanos, con una exactitud del 91.36% frente al 80.25% del CNN, utilizando un conjunto de imágenes de $n=324$. Ambos modelos fueron evaluados bajo el mismo procesamiento de imágenes, entrenados y evaluados con la técnica de validación cruzada, lo que permitió una comparación justa entre ellos.

4. Conclusiones

Como principal aportación en este trabajo, se propone una metodología la cual realiza una exhaustiva comparativa de dos diferentes algoritmos clasificadores de IA, simple KNN de ML y CNN de DL, ambos evaluados ante los mismos diferentes procesamientos de imágenes RX de pacientes con covid y sanos.

En base a la literatura revisada, el modelo simple KNN usado en esta metodología, no había sido antes explorado para la base de datos utilizada, siendo así también otra principal aportación al estado del arte.

En este contexto, los principales hallazgos fueron los siguientes:

- El procesamiento de imágenes con mejores resultados para ambos modelos (KNN y CNN), fue el reescalado de las imágenes de 160×160 píxeles, junto con la conversión a escala de grises y la aplicación de filtro de mediana.
- Para el caso KNN, siguiendo la metodología propuesta, se consiguió una exactitud del 91.36%, lo que permite diferenciar adecuadamente entre px con covid y sanos.
- Para el caso CNN, se consiguió una exactitud inicial del 76.54% ante una configuración inicial de arquitectura, siguiendo la metodología para optimizar estos parámetros, se consiguió alcanzar el 80.25% de exactitud.

En este estudio, KNN superó a CNN en la clasificación de imágenes por un 11.11%, demostrando que modelos simples como KNN pueden ser más eficientes y requieren menos recurso computacional, siendo así ideales para conjuntos de datos pequeños o cuando se prioriza rapidez y simplicidad, sin perder eficiencia.

En este contexto, aun con los aportes y resultados obtenidos, es necesario continuar investigando para desarrollar modelos más eficientes y precisos, e inclusive implementar estas herramientas con otras enfermedades pulmonares, por ejemplo, las no infecciosas como el asma y la bronquitis.

Aunque no era el objetivo principal de este trabajo, se lograron exactitudes aceptables. Sin embargo, para trabajos futuros, se podrían aplicar técnicas como: aumento de datos, expandir la propia base de datos con nuevas imágenes RX o usar enfoques híbridos que combinen las fortalezas de ambos modelos (KNN y CNN), para seguir la presente metodología y evaluar nuevos resultados.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca número 1316053.

Referencias

- [1] de León, J. D. L. P., Cárdenas-Marín, P. A., Giraldo-González, G. C., & Herrera-Escandón, Á. (2020). Coronavirus–COVID 19: Más allá de la enfermedad pulmonar, qué es y qué sabemos del vínculo con el sistema cardiovascular. *Revista Colombiana de cardiología*, 27(3), 142-152. <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2020.04.006>
- [2] Castro, H. Y. P. (2024). Impacto de la covid-19 en pacientes con insuficiencia renal: prevalencia, mortalidad y secuelas. *Revista Alcance*, 7(1). <https://doi.org/10.47230/ra.v7i1.59>
- [3] Arandia-Guzmán, J., & Antezana-Llaveta, G. (2020). SARS-CoV-2: estructura, replicación y mecanismos fisiopatológicos relacionados con COVID-19. *Gaceta Médica Boliviana*, 43(2), 170-178. <https://doi.org/10.47993/gmb.v43i2.85>
- [4] Becerra-Muñoz, V. M., Sáenz, J. T. G., & Subías, P. E. (2024). La importancia de los datos en la hipertensión arterial pulmonar: de los registros internacionales al machine learning. *Medicina Clínica*. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2023.12.010>
- [5] Pineda, J. M. (2022). Modelos predictivos en salud basados en aprendizaje de maquina (machine learning). *Revista Médica Clínica Las Condes*, 33(6), 583-590. <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2022.11.002>
- [6] López-Cabrera, J. D., Díaz, J. A. P., Morales, R. O., & Díaz, M. P. (2020). Revisión crítica sobre la identificación de COVID-19 a partir de imágenes de rayos x de tórax usando técnicas de inteligencia artificial. *Revista Cubana De Transformación Digital*, 1(3), 67-99. <https://rctd.uic.cu/rctd/article/view/103>
- [7] Álvarez, J., Concejo, P., Ferreira, C., Gálvez, E., Hoyas, M. A., Zubiaguirre, I., ... & Martínez, M. (2020). Hallazgos de imagen en Covid-19. Complicaciones y enfermedades simuladoras. *Revista chilena de radiología*, 26(4), 145-162. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-93082020000400145>
- [8] Estrada, A., & Álvarez, E. A. (2020, October). Herramienta para la Detección Automática de Lesiones de COVID-19 en Tomografías Computarizadas. In *Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica* (Vol. 7, No. 1, pp. 125-132). <https://dx.doi.org/10.24254/CNIB.20.16>
- [9] Tiwari, S., Chanak, P., & Singh, S. K. (2022). A review of the machine learning algorithms for COVID-19 case analysis. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, 4(1), 44-59. <https://doi.org/10.1109/TAI.2022.3142241>
- [10] Atta-ur-Rahman, A., Sultan, K., Naseer, I., Majeed, R., Musleh, D., Salam-Gollapalli, M. A., ... & Adnan-Khan, M. (2021). Supervised machine learning-based prediction of COVID-19. *Computers, Materials & Continua*, 69(1), 21-34. doi:10.32604/cmc.2020
- [11] Alyasseri, Z. A. A., Al-Betar, M. A., Doush, I. A., Awadallah, M. A., Abasi, A. K., Makhadmeh, S. N., ... & Zitar, R. A. (2022). Review on COVID-19 diagnosis models based on machine learning and deep learning approaches. *Expert systems*, 39(3), e12759. <https://doi.org/10.1111/exsy.12759>
- [12] Montoya, Y. A. C., & Cornejo, S. A. G. (2022). Detección de COVID-19 a partir de imágenes radiográficas utilizando redes neuronales convolucionales: Una revisión bibliográfica. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 4. <https://doi.org/10.47796/ing.v4i0.626>
- [13] Aslan, M. F., Sabanci, K., Durdu, A., & Unlarsen, M. F. (2022). COVID-19 diagnosis using state-of-the-art CNN architecture features and Bayesian Optimization. *Computers in biology and medicine*, 142, 105244. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2022.105244>
- [14] López-Cabrera, J. D., & Pérez-Díaz, M. (2022). Explainable artificial intelligence, a perspective to the automatic classification of COVID-19 through chest X-rays problem. *MediSur*, 20(2), 341-351. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumenI.cgi?IDARTICULO=116209>
- [15] G. L. Kaggle. [En línea]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/jaidalmotra/covid-19-vs-normal-chest-x-rays/data>
- [16] Solomon, C., & Breckon, T. (2011). *Fundamentals of Digital Image Processing: A practical approach with examples in Matlab*. John Wiley & Sons.
- [17] Gonzalez, R. C. (2009). *Digital image processing*. Pearson education india.
- [18] OpenCV. (s.f.). Open Source Computer Vision Library. <https://opencv.org>
- [19] TensorFlow. (s.f.). TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems. <https://www.tensorflow.org>
- [20] Duda, R.O.; Hart, P.E.; Stork, D.G. *Pattern Classification*, 2nd ed.; J. W. & Sons: Malden, MA, USA, 1999.
- [21] Jaramillo-Quintanar, D., Cruz-Albarran, I. A., Guzman-Sandoval, V. M., & Morales-Hernandez, L. A. (2020). Smart sensor based on biofeedback to measure child relaxation in out-of-home care. *Sensors*, 20(15), 4194. <https://doi.org/10.3390/s20154194>
- [22] Taunk, K., De, S., Verma, S., & Swetapadma, A. (2019, May). A brief review of nearest neighbor algorithm for learning and classification. In 2019 international conference on intelligent computing and control systems (ICCS) (pp. 1255-1260). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCS45141.2019.9065747>
- [23] Trejo-Chavez, O., Amezcua-Sanchez, J. P., Huerta-Rosales, J. R., Morales-Hernandez, L. A., Cruz-Albarran, I. A., & Valtierra-Rodriguez, M. (2022). Automatic Knee Injury Identification through Thermal Image Processing and Convolutional Neural Networks. *Electronics*, 11(23), 3987. <https://doi.org/10.3390/electronics11233987>
- [24] Krizhevsky, A.; Sutskever, I.; Hinton, G.E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Commun. ACM* 2017, 60, 84-90. <https://proceedings.neurips.cc/paper/2012/hash/c399862d3b9d6b76c8436e924a68c45b-Abstract.html>
- [25] Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning* by Christopher M. Bishop. Springer Science+ Business Media, LLC.

Toma de decisiones, sesgos y heurística en el proceso de diseño arquitectónico

Decision making, biases and heuristics in the architectural design process

Liahut Caraveo Midory Maythe
Magos Carrillo María Esther
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
mmliahut@gmail.com

Palabras clave: ARQ, Procesos de diseño, Toma de decisiones, sesgos, intuición, heurísticos

Resumen- Este artículo tiene como objetivo reflexionar sobre la intuición en la toma de decisiones durante la conceptualización de proyectos arquitectónicos, abordando tanto los beneficios como los sesgos cognitivos que pueden influir durante el proceso creativo. La intuición se presenta como una herramienta que permite a los arquitectos tomar decisiones rápidas y eficaces en las primeras fases del proceso de diseño. A través de un análisis de diversas teorías sobre la toma de decisiones intuitivas, se busca profundizar en la relación entre la intuición y el diseño arquitectónico, destacando su importancia en la resolución de problemas complejos. Sin embargo, la intuición no está exenta de limitaciones, como los sesgos cognitivos que pueden influir negativamente en la calidad de las decisiones. El artículo explora cómo estos sesgos pueden llevar a errores de juicio. En este contexto, se discute la posibilidad de utilizar herramientas como los Sistemas de Soporte de Decisiones, que combinan la intuición con análisis basados en datos, ayudando a los arquitectos a potenciar su intuición para una toma de decisiones coherente.

Keywords: Design process, decision making, biases, intuition, heuristics

Abstract- This article aims to reflect on intuition in decision-making during the conceptualization of architectural projects, addressing both the benefits and cognitive biases that can influence the creative process. Intuition is presented as a tool that enables architects to make quick and effective decisions in the early stages of the design process. Through an analysis of various theories on intuitive decision-making, the article seeks to delve into the relationship between intuition and architectural design, highlighting its importance in solving complex problems. However, intuition is not without limitations, such as cognitive biases that can negatively impact decision quality. The article explores how these biases can lead to judgment errors. In this context, it discusses the possibility of using tools like Decision Support Systems, which combine intuition with data-based analysis, helping architects to enhance their intuition for coherent decision-making.

1. Introducción

La toma de decisiones ha sido tradicionalmente entendida como un proceso racional y objetivo basado en el análisis y probabilidades, en el famoso pensar antes de actuar, sin embargo, nada podría estar más alejado de la realidad ya que las emociones son inherentes al ser humano [1]. Investigaciones recientes en psicología y ciencias cognitivas [2], han demostrado que la toma de decisiones no es puramente racional, sino que está influenciada por la intuición, las emociones y los sesgos cognitivos. Aunque la intuición puede ser una herramienta poderosa y eficaz, especialmente en contextos de incertidumbre como la fase de conceptualización del diseño arquitectónico, su uso sin orientación puede llevar a errores de juicio, dado que a menudo actúa bajo condiciones de exceso o carencia de información [3, 4]. Este artículo explora el papel de la intuición en el diseño arquitectónico y cómo los sesgos y heurísticos pueden influir en las decisiones tomadas en esta fase crítica. Si bien la intuición es valiosa para la creatividad y la resolución rápida de problemas, también puede resultar en simples adivinanzas si no está adecuadamente guiada [3]. A través de la revisión de estudios sobre sesgos cognitivos, heurísticos, toma de decisiones y sistemas de soporte, se busca entender cómo potenciar una intuición más precisa para optimizar el proceso de diseño.

2. Metodología

Este artículo sigue una **metodología de investigación documental**, basada en la revisión de la literatura sobre la toma de

decisiones intuitivas y su impacto en la fase de conceptualización del diseño arquitectónico. Debido a la falta de estudios que aborden específicamente la intuición en este contexto, se desarrolló una **definición operativa de intuición** basada en cinco conceptos clave: toma de decisiones, situaciones complejas, asociaciones mentales, visión holística y capacidad de anticipar fenómenos. Estos conceptos guiaron la selección de autores cuyas investigaciones permiten comprender cómo la intuición opera en situaciones de información ambigua o incompleta. De acuerdo con diversos autores, la intuición puede definirse como:

-Una forma de conocimiento rápido y valioso para situaciones complejas[5]

-La facultad humana de presentir la realidad en su unidad originaria, antes de que se manifieste en la diversidad de fenómenos y conceptos[6]

-Una respuesta automática y rápida del sistema 1 a una situación, basada en asociaciones inconscientes y heurísticas[3]

-Un proceso cognitivo sofisticado y adaptativo que nos permite tomar decisiones rápidas y efectivas en situaciones complejas[2].

A partir de estas definiciones, se analizó la fase de conceptualización y su importancia en el proceso de diseño arquitectónico, con el fin de entender cómo la intuición puede optimizar la toma de decisiones en este contexto (Fig. 2). La revisión se centró en tres objetivos clave:

- 1.-**Optimizar la toma de decisiones** en cuanto a la selección de datos relevantes que sean útiles para esta fase y las subsecuentes.
- 2.-**Agilizar la selección de información relevante.**

3.-Facilitar la búsqueda eficiente de información, permitiendo descartar datos innecesarios.

Estos objetivos responden a los problemas comunes enfrentados por los diseñadores en la fase de conceptualización, detallados en el apartado de análisis. Además, se incorporaron autores que explican los sesgos cognitivos y heurísticos que influyen en la toma de decisiones intuitiva, y se exploró el uso de **Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD)** como herramienta complementaria para mitigar estos sesgos y mejorar la coherencia en el proceso de diseño (Fig.1)

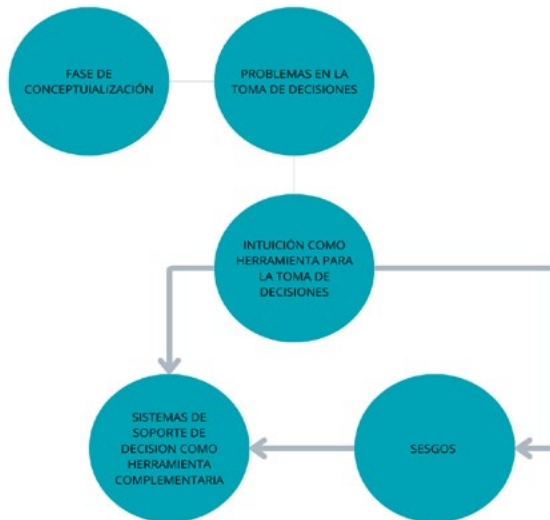


Fig. 1 diagrama de metodología. Elaboración propia.

3.-Análisis

La fase de conceptualización es donde se hace el planteamiento del problema, es una etapa que demanda significativamente al diseñador por su exceso de información, y debe tomar decisiones clave que influirán en todo el proyecto [7]. En fase implica

organizar, jerarquizar y seleccionar información relevante que servirá de base para orientar el desarrollo del diseño. Estos procesos de diseño no siguen una lógica puramente racional, sino que, además, incorporan diversas actividades mentales, como la imaginación, la creatividad y la intuición [8]. Estos procesos no son completamente racionales; además de la lógica, incluyen actividades mentales como la creatividad, la imaginación y, especialmente, la intuición [8]. Cada elección en esta etapa representa un nodo importante en el sistema de toma de decisiones, donde continuamente se evalúan y descartan opciones [9]

La intuición permite hacer juicios rápidos y precisos con una pequeña cantidad de información, basados en la experiencia y el reconocimiento de patrones [5]. Actúa como un proceso cognitivo eficaz en situaciones complejas y de incertidumbre, donde los datos son incompletos. A través de la intuición el diseñador es capaz de hacer asociaciones no evidentes de información y anticipar posibles resultados [10]. Este tipo de juicio intuitivo puede potenciarse a través del desarrollo de habilidades de reflexión y raciocinio [11]. Durante la fase de conceptualización, el exceso de información puede dificultar la identificación de los datos realmente relevantes. Aquí, la intuición ayuda al arquitecto a descartar información innecesaria, priorizando la que añade valor al proyecto. No obstante, este proceso intuitivo también está sujeto a limitaciones y sesgos, los cuales discutiremos a continuación.

Problemas dentro de la toma de decisiones en la fase de conceptualización.

En la fase de conceptualización los diseñadores enfrentan una sobreabundancia de información, de la cual no toda es información relevante lo que genera el problema de filtrar adecuadamente esta

información [4]. La dificultad radica en identificar, bajo condiciones de incertidumbre, qué datos son esenciales para la toma de decisiones y cuáles podrían distraer o desviar el foco del proyecto y aquí surge una pregunta, ¿Cómo asegurarse de que los datos seleccionados sean no solo relevantes para la fase de conceptualización, sino que también proporcionen valor en las fases subsecuentes posteriores del diseño?

Además del exceso de información con la que se trabaja en esta fase otro problema es la necesidad de tomar decisiones rápidas, lo cual ocasiona conflicto con el tiempo necesario para analizar grandes volúmenes de información. Entonces, los diseñadores tienen que tomar decisiones de manera ágil, pero esto puede comprometer la calidad de información procesada si no se cuenta con una estrategia clara de priorización. En este punto surge la siguiente pregunta, ¿Cómo balancear la rapidez en la toma de decisiones sin sacrificar precisión?

El exceso de información puede ralentizar el proceso de diseño, especialmente cuando los datos irrelevantes distraen de lo que realmente importa refiriéndonos a las necesidades de cada proyecto, tendría que existir un método eficiente de búsqueda y descarte de información innecesaria, que permitan al diseñador centrarse en lo que realmente agrega valor al proyecto.

A partir de estos problemas, se definieron los siguientes objetivos en la fase de conceptualización:

- 1.- **Optimizar la selección de datos** para su relevancia en esta y las fases futuras.
- 2.- **Agilizar la priorización de información clave** para reducir tiempos de análisis.
- 3.- **Facilitar la búsqueda y descarte de datos irrelevantes**, centrando al diseñador en

lo esencial.

Intuición como herramienta para la toma de decisiones

[3], propone un modelo de toma de decisiones basado en dos sistemas cognitivos que funcionan de manera complementaria. El Sistema 1 es rápido, automático, y emocional. Se activa de manera intuitiva, respondiendo casi de forma instantánea a los estímulos sin requerir un análisis profundo. Es el sistema que utilizamos en situaciones cotidianas,

donde las decisiones deben tomarse con rapidez y sin esfuerzo consciente. Este sistema es propenso a los sesgos cognitivos, ya que se basa en patrones previos y atajos mentales para tomar decisiones.

Por otro lado, el **Sistema 2** es más lento, deliberado y lógico. Requiere mayor esfuerzo mental y se activa cuando se necesita analizar información de manera detallada, evaluar opciones o resolver problemas complejos. El Sistema 2 se utiliza cuando la toma de decisiones implica reflexionar y considerar varios factores. Aunque este sistema es más preciso, su activación requiere más tiempo y recursos cognitivos, lo que lo hace menos eficiente en situaciones de urgencia.

La **intuición** está estrechamente vinculada al funcionamiento del **Sistema 1**. Al ser un proceso rápido y automático, la intuición permite tomar decisiones sin necesidad de un análisis consciente. Estas decisiones suelen basarse en experiencias pasadas, patrones previamente aprendidos o conocimientos implícitos que surgen en el momento sin que la persona los procese de manera consciente.

A menudo, la intuición se asocia con el "instinto" o el "sexto sentido", ya que



responde de manera inmediata a las señales del entorno, pero está lejos de ser un proceso irracional. Aunque el Sistema 1 es rápido y no deliberado, se apoya en una base de conocimientos y experiencias acumuladas, lo que le da una utilidad considerable en la toma de decisiones.

Las **emociones** desempeñan un papel fundamental en la toma de decisiones rápidas, ya que están directamente conectadas con el **Sistema 1**. A diferencia del Sistema 2, que analiza de manera objetiva, el Sistema 1 es más susceptible a influencias emocionales. Las emociones guían nuestra intuición y pueden ayudarnos a reaccionar rápidamente en situaciones de alta presión o incertidumbre. Por ejemplo, en el diseño arquitectónico, donde las decisiones rápidas son cruciales para avanzar en un proyecto, las emociones pueden actuar como catalizadores para que la intuición funcione con mayor eficacia.

El hecho de que las emociones influyan en el proceso no siempre es negativo, pero también pueden generar **sesgos**, por lo tanto, aunque las decisiones rápidas impulsadas por intuición pueden ser efectivas, es esencial ser consciente de estos sesgos.

Sesgos y heurísticos

Los sesgos cognitivos son errores sistemáticos que influyen en la forma en que procesamos información y tomamos decisiones. Surgen debido a las limitaciones en la capacidad del cerebro para gestionar grandes volúmenes de datos en entornos complejos [12]. Aunque los heurísticos o atajos mentales nos permiten enfrentar situaciones rápidamente, su uso excesivo puede llevar a decisiones incorrectas. Los tres



heurísticos más comunes que afectan la toma de decisiones en diseño son [13]:

1.-Heurístico de representatividad:

Este atajo mental consiste en evaluar la probabilidad de que algo pertenezca a una categoría en función de su similitud con otros ejemplos típicos de dicha categoría. Por ejemplo, en diseño arquitectónico, un arquitecto podría suponer que un proyecto tendrá éxito si se asemeja a otros proyectos exitosos previos, sin considerar adecuadamente otros factores clave como por ejemplo las necesidades complejas del cliente.

2.-Heurístico de disponibilidad:

Este sesgo ocurre cuando una persona se basa en la información que viene a su mente más fácilmente

(generalmente por ser reciente o destacada) para tomar una decisión. En el contexto del diseño, un arquitecto puede priorizar soluciones que haya utilizado recientemente o que se le vengan a la mente en ese momento decisivo, incluso si no son las más adecuadas para el nuevo proyecto.

3.-Heurístico de anclaje:

Este heurístico se refiere a la tendencia a depender demasiado de la primera información que se recibe (el "ancla") un ejemplo en diseño sería cuando un arquitecto se fija en una idea inicial o una referencia visual y le resulta difícil ajustarse a nuevas opciones, aunque sean más viables.

Estos heurísticos generan sesgos que limitan la capacidad de la intuición para generar soluciones coherentes a cada proyecto arquitectónico ya que influyen en cómo se procesa y prioriza la información. Ser consciente del riesgo que corremos al hacer



uso de una intuición no guiada lleva a emplear otras herramientas que ayuden a guiarla, como lo son por ejemplo los sistemas de soporte de decisiones, permitiendo que la intuición sea un recurso valioso y no una fuente de error en el proceso de diseño.

Sistemas de soporte de decisiones

Los Sistemas de Soporte a las Decisiones (SSD) son herramientas tecnológicas diseñadas para ayudar a los profesionales a tomar decisiones más informadas y estructuradas, particularmente en entornos complejos donde hay un exceso de información[14]. Estos sistemas permiten organizar, jerarquizar y visualizar datos de manera eficiente, ofreciendo un marco de análisis que facilita la toma de decisiones más coherentes al planteamiento del problema. En el diseño arquitectónico, los SSD podrían proporcionar a los arquitectos la capacidad de evaluar múltiples variables y criterios simultáneamente, integrando tanto aspectos cuantitativos y cualitativos en sus proyectos. Además, ayudan a organizar información relevante y jerarquizarla [15] de esta manera los diseñadores podrían ver esos datos que son esenciales para el proyecto y cómo ese dato se relaciona con la demás información.

Los SSD permiten que la intuición sea más precisa y efectiva al proporcionar datos objetivos y estructurados, lo que ayuda a reducir la influencia de sesgos.

Al organizar y jerarquizar la información de manera clara, los SSD proporcionan un mapa que guía al arquitecto en la exploración de las diferentes opciones de diseño. Esto permite que la intuición fluya dentro de un marco más controlado, asegurando que las decisiones rápidas y automáticas se complementen con



de depender exclusivamente de atajos mentales, el arquitecto tiene acceso a un análisis más profundo, lo que le permite potenciar su intuición con información relevante.

Por ejemplo, un SSD podría ayudar a priorizar criterios basados en el sistema de la persona que va a habitar [16], la obra arquitectónica es un componente del sistema vital, y como tal, vinculada inherentemente con el proceso que le configura. [...]El diseño arquitectónico asume entonces el rol de un proceso configurador dentro del sistema vital, un sistema autopoietico que permite la generación de su propia estructura, una estructura congruente con el sistema mismo [16].

Estos sistemas de soporte de decisión ayudarían a que el diseñador combine su visión intuitiva con las limitaciones y requerimientos del contexto, permitiendo que la intuición se oriente de manera más coherente hacia soluciones referentes al sistema generador, osea las personas que lo habitarán.

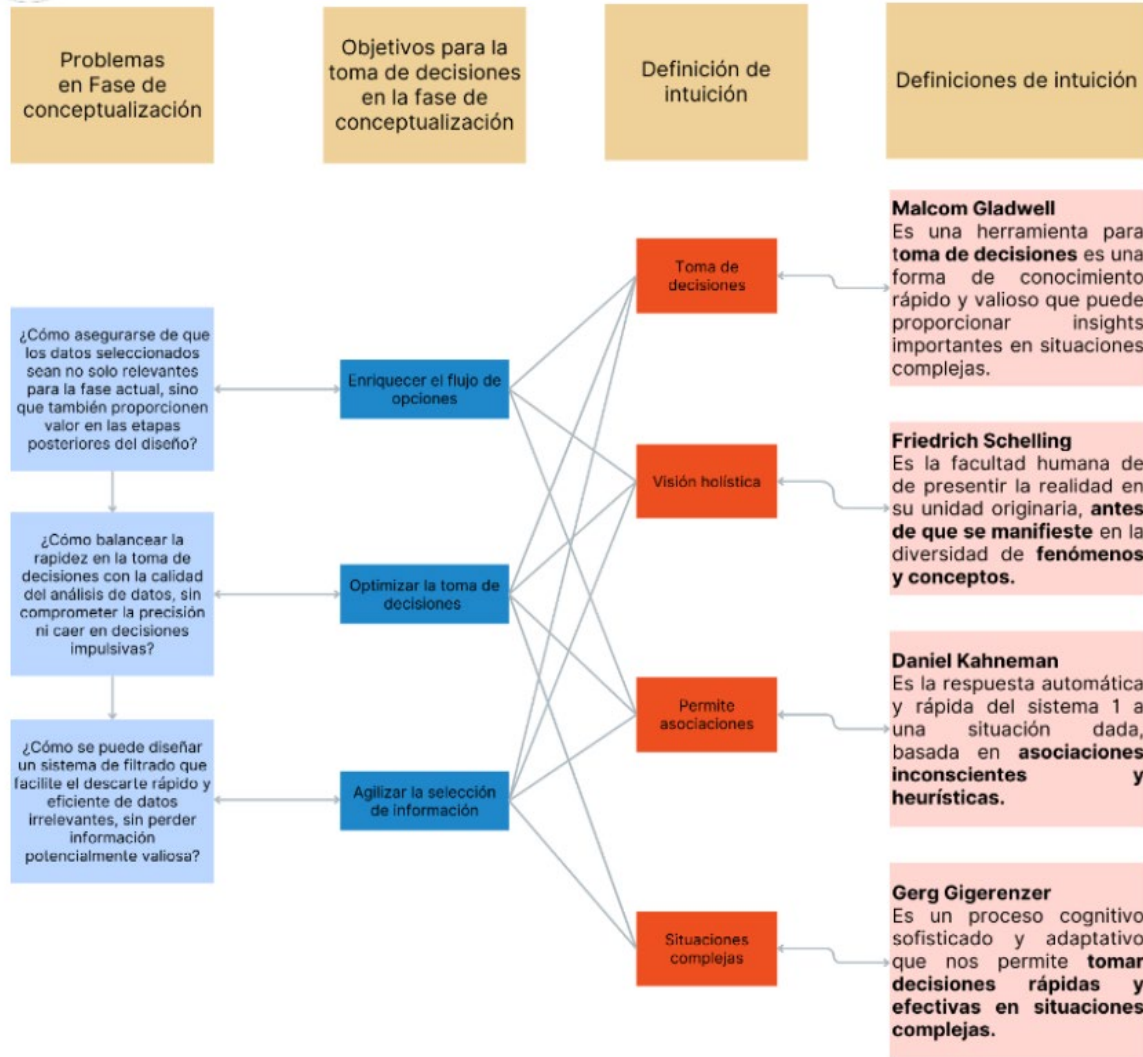


Fig. 2 Definición operativa de intuición.
Elaboración propia

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos del análisis de la toma de decisiones en la fase de conceptualización arquitectónica revelan que la intuición, cuando se utiliza de manera consciente y objetivada, puede ser una herramienta valiosa para los arquitectos. Sin embargo, esta intuición necesita estar guiada, ya que está sujeta a sesgos cognitivos como el de representatividad, disponibilidad

de información y anclaje. Estos sesgos tienden a distorsionar la percepción del

arquitecto, lo que puede llevar a decisiones que no siempre son coherentes con los objetivos del proyecto.

Dado el impacto que estos sesgos pueden tener en la calidad de las decisiones, se destaca la importancia de contar con herramientas que ayuden a orientar y fortalecer la intuición del arquitecto. Los **Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD)** se presentan como una solución



complementaria eficaz, ya que ofrecen un marco estructurado que guía el proceso intuitivo del arquitecto y reduce la influencia de los sesgos cognitivos.

En particular, el análisis muestra que los SSD permiten al arquitecto organizar y jerarquizar la información relevante de manera más efectiva, lo que facilita la identificación de los datos realmente importantes para el proyecto. Al proporcionar datos objetivos y una estructura clara, los SSD respaldan la toma de decisiones intuitiva, permitiendo que el arquitecto se concentre en opciones fundamentadas y bien orientadas. Esto resulta en una toma de decisiones más coherente y alineada con los objetivos del proyecto, combinando la creatividad intuitiva con la precisión analítica.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por los recursos otorgados para la investigación en este país y sobre todo por los otorgados para el desarrollo de la presente investigación y estudios de la maestría.

Referencias

[1] Illouz, Eva (2012, 12 de Octubre). ¿Quién controla el conocimiento? [video] <https://www.youtube.com/watch?v=XREth4Bj>

[2] Gigerenzer, G. y Selten, R. (2001). Bounded rationality: The adaptive toolbox. Cambridge, Ma: The MIT Press.

[3] Kahneman, D (2007) piensa rápido piensa despacio.

[4] Magos E. (2019) Herramienta de diseño: Sistema para búsqueda y síntesis de información que genera marcos conceptuales de los componentes del Fenómeno Arquitectónico.

[5] Gladwell, M. (2005). Blink: The power of thinking without thinking. Little, Brown and Company.

[6] Schelling, F. W. J. (1978). *The system of transcendental idealism (1800)*. University Press of Virginia. (trabajo original publicado 1800)

[7] Álvarez Tamayo, Dora. Inteligencia de Diseño, una mirada orientada a la innovación desde un ángulo semiótico. Comunicación, 2022. Junio-Julio, año 22. Pp. 45 – 59 ISSN 168-0227

[8] Contreras, Luis. La inteligencia intuitiva y la educación en creatividad. Actualidades Pedagógicas,(62),165187.<https://doi.org/10.19052/a> p.2697.

[9] Corrales Navarro, Elizabeth. La intuición como proceso cognitivo. Comunicación, 2010. Agosto-diciembre, año 31 / vol. 19, número 002. Instituto Tecnológico de Costa Rica. pp.33-42. ISSN Impresa 0379-3974/ e-ISSN 0379-3974

[10] Liahut, M. Herramienta de diseño arquitectónico que guía los procesos intuitivos del diseñador, agosto 2024.

[11] Klein, G. (1998). *Sources of power: How people make decisions*. MIT Press

[12] Tversky, Amos N. & Kahneman, Daniel (1974). "Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases", *Science*, Vol. 185, No 27, September, 1124-1131.

[13] Gilovich, T., Griffin, D. y Kahneman, D. (eds.) (2002). *Heuristics and biases: The psychology of intuitive judgment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

[14] Turban, E., Sharda, R., & Delen, D. (2011). *Decision support and business intelligence systems* (9th ed.). Pearson Education.

[15] Power, D. J. (2002). *Decision support systems: Concepts and resources for managers*. QuorumBooks.

[16] Flores A., "Del concepto formal a la conceptualización sistémica en el diseño arquitectónico", *Contexto*, vol. 14, núm. 20, pp. 115–123, abril. 2020, doi: 10.29105/contexto 14.20-7.

[17] Flores, A. Fenómeno Arquitectónico, Proceso de diseño y complejidad humana: Propuesta de re-conceptualización. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA. *Contexto*, vol. 14, núm. 20, pp. 115–123, abril. 2020, doi: 10.29105/contexto 14.20-7

Relación del índice de rugosidad y pendiente de vialidad urbana con el consumo de combustible

Relation between pavement roughness and slope of urban roads with fuel consumption.

Moreno Barrón Miguel, Montoya Zamora Ricardo
Dirección de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
miguel.mrbr@outlook.com

Palabras clave: VTM, consumo de combustible, índice de rugosidad internacional, vehículo híbrido, pendiente longitudinal.

Resumen- El consumo de combustible de los vehículos es necesario para analizar el costo de operación, se han realizado diversos estudios para el sector carretero lo que ha facilitado el análisis económico y financiero de proyectos carreteros, por otro lado, las zonas urbanas no han tenido el mismo interés y resulta imprescindible realizar investigaciones que aporten al sector vial urbano. Para aportar una pequeña parte se analiza la relación del consumo de combustible con el índice de regularidad de las vialidades y la pendiente longitudinal mediante recorridos con vehículos de combustión e híbridos, una aplicación que calcula el índice de regularidad con el acelerómetro y datos obtenidos del desempeño vehicular con dispositivos OBD-II.

Keywords: VTM, fuel consumption, international roughness index, hybrid vehicle, longitudinal slope.

Abstract- Vehicle's fuel consumption is necessary to analyze the vehicle operating cost, various studies have been carried out for the highway sector which has facilitated the economic and financial analysis of highway projects, on the other hand, urban areas have not had the same interest, and it is essential to carry out research that contributes to the urban road sector. To contribute a small part, the relationship of fuel consumption with the regularity index of the roads and the longitudinal slope is analyzed by means of routes with combustion and hybrid vehicles, an application that calculates the regularity index with the accelerometer and data obtained from vehicle performance with OBD-II devices.

1. Introducción

El transporte es un medio fundamental para que los seres humanos puedan desplazarse de un lugar a otro, así como llevar mercancía en los distintos tipos de transporte existentes como el aéreo, marítimo y terrestre. El uso de estos medios genera consecuencias negativas al medio ambiente y a la salud [1], [2], [3], [4].

Los avances tecnológicos han permitido desarrollar vehículos híbridos propulsados a gasolina con apoyo de un motor eléctrico y también vehículos eléctricos con motor libre de combustible fósil. La ventaja que presentan

el tener un motor distinto, al que funciona en su totalidad con gasolina o diesel, es la reducción de emisiones contaminantes; lo que representa una solución para lograr una sociedad sustentable mitigando el efecto

invernadero y utilizando los recursos naturales de manera sostenible [5], [6], [7].

El parque vehicular en México presenta una tendencia creciente llegando a los 58,199,293 vehículos en circulación en 2023 [8], lo que resulta en un incremento en las emisiones contaminantes producidas por motores a gasolina y diesel. Para aumentar el uso de tecnologías más amigables con el medio ambiente como los vehículos híbridos y eléctricos es necesario tener la información que permita modelar el comportamiento de éstos con el fin de predecir el desempeño para distintos escenarios, en este caso, la pendiente longitudinal de las vialidades y el índice de rugosidad (IRI) afectan al consumo de combustible de los vehículos [9], el impacto que genera la primera en el consumo de combustible y los factores de emisiones en estimaciones reales-urbanas es de entre 2 y 5 por ciento en vehículos de combustión de pasajeros [10]. Un vehículo que circula por una vialidad en buenas condiciones (sin baches) y con pendiente cercana a cero (horizontal) por ciento consume menos combustible porque requiere menos esfuerzo, del otro lado, una vialidad en malas condiciones y con pendiente mayor va a requerir de mayor esfuerzo el motor tendrá que revolucionarse más para poder avanzar.

Algunos estudios realizados con anterioridad por [11] en dos carreteras planas y [12] en carreteras urbanas, donde la velocidad de operación es más uniforme que en la ciudad donde se requiere frenar y acelerar con frecuencia se enfocaron al sector carretero, estimaron el consumo de combustible y el costo de operación (COV) con el uso del Highway Development and Management 4 (HDM-4) calibrando los parámetros de los vehículos y las condiciones de las carreteras, los modelos no presentan una calibración para el desempeño que presentan los vehículos que circulan en zonas urbanas.

2. Metodología

Obtención de datos. Para la obtención de datos del desempeño del vehículo se conectó un dispositivo con sistema de diagnóstico vehicular, por sus siglas en inglés OBD-II, la información generada, mientras el motor permanece en marcha, se almacenó en un dispositivo móvil, algunos de los datos que se pueden leer con el dispositivo OBD-II son: latitud, longitud, altitud, velocidad media de marcha, revoluciones por minuto del motor, aceleración en los ejes x, y, z, orientación respecto al norte, emisiones, consumo de combustible, entre otros.

Medición del IRI. Para la medición del IRI se utilizó la aplicación “IRI” de TotalPave, los cálculos se obtienen con las aceleraciones que experimenta el móvil (acelerómetro), es necesario colocarlo en una base fija que no presente vibraciones adicionales a las del vehículo, por ello se colocó en una base fija adherida al parabrisas y no en las ventilas del aire acondicionado, es importante usar el nivel digital de la aplicación para lograr que las mediciones tengan un error máximo del 10% en comparación con perfilómetro inercial [13].

Análisis de datos.

La información generada por el vehículo y registrada por la aplicación del dispositivo OBD-II se almacenó como un archivo de texto delimitado por comas; por otro lado, la información del índice de rugosidad internacional tiene formato shape, los valores se miden en mm/m o m/km en tramos de 50 metros.

Con la finalidad de acotar los tramos de estudio se generaron copias de los archivos originales para manipular los datos sin perder información, se eliminaron filas duplicadas, valores nulos y cero, a este proceso se le conoce como validación de datos. Las

variables independientes son: el IRI y pendiente longitudinal; las dependientes son: el flujo del combustible y las revoluciones por minuto del motor.

En el software QGIS se reproyectaron los datos de coordenadas geográficas a coordenadas proyectadas Universal Transverse Mercator (UTM) con datum WGS-84 para generar un campo con la distancia horizontal entre cada punto de los recorridos realizados mediante la fórmula:

$$distancia = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

y la pendiente longitudinal con la diferencia de elevaciones entre la distancia

$$pendiente\ longitudinal = \frac{h_2 - h_1}{distancia} * 100 \quad (2)$$

3. Resultados y discusión

Los archivos generados por el OBD-II se relacionan con los valores del IRI mediante el vecino más cercano en QGIS, posteriormente se exporta un archivo en formato de texto delimitado por comas (csv) como el que se muestra en la Fig. 1.

engine_RPM	iri	elev	distancia	pendiente	pend_media
2367.5	2.185	1867.960	13.339	2.550	5.144
2377.5	2.185	1868.300	13.699	7.737	3.649
2389	1.600	1869.360	13.648	0.659	1.513
2346	1.600	1869.450	13.476	-3.858	0.728

Figura 1. Fragmento de archivo con información del desempeño vehicular registrado por el dispositivo OBD-II.

El archivo en formato shape del IRI se muestra en tramos de 50 metros agrupados por intervalos para identificar más rápido el valor de cada segmento de la vialidad, en la Fig. 2 se muestra un fragmento del mapa con valores que van del 2.12 hasta 14.15 milímetros por metro.

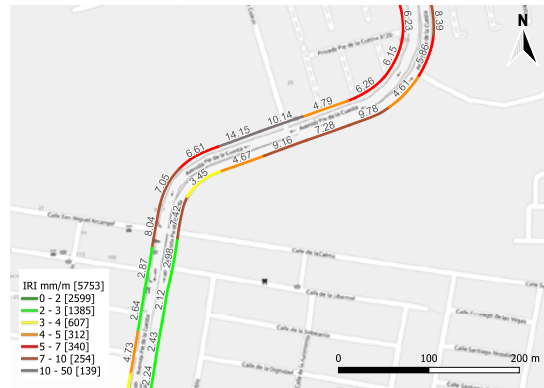


Figura 2. Valores del IRI en tramos de 50 metros generados con aplicación "IRI" de TotalPave. Fuente propia.

La media obtenida del índice de rugosidad internacional es de 2.90 milímetros por metro, esto se puede interpretar como la diferencia de elevaciones acumulada respecto a la superficie de rodamiento en milímetros por metro o metros por kilómetro.

Los valores de RPM se mantienen en 1000 y 2000 cuando el vehículo de combustión circula en pendiente descendente, la Fig. 3 muestra cómo aumentan las RPM conforme va avanzando el vehículo.

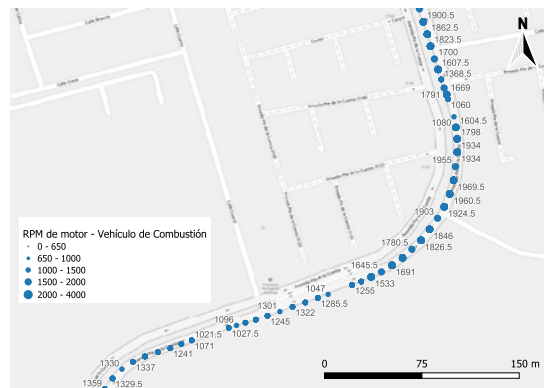


Figura 3. RPM de motor de vehículo de combustión, pendiente descendente de sur a norte. Fuente propia.

Por otro lado, el motor debe revolucionarse por encima de 2000 RPM para poder avanzar como se observa en la Fig. 4 donde el valor máximo fue de 2,562 revoluciones por minuto.

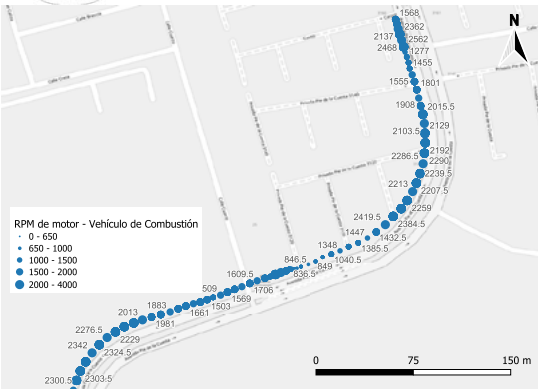


Figura 4. RPM de motor del vehículo de combustión, pendiente ascendente de norte a sur. Fuente propia.

A diferencia de los vehículos propulsados únicamente con motor de combustión, los híbridos revolucionan menos su motor a gasolina debido al segundo motor el cual, es eléctrico, en la *Fig. 5* se muestran los valores de RPM de un vehículo híbrido en el mismo tramo con pendiente ascendente.



*Figura 5. RPM de motor del vehículo híbrido.
Fuente propia.*

Al circular por pendientes descendentes o cercanas al cero el motor a combustión deja de funcionar y sólo trabaja el motor eléctrico para ahorrar combustible, en las pendientes ascendentes sucede lo mismo cuando el vehículo obtiene una velocidad que le permita continuar subiendo únicamente con el motor eléctrico como se observa en la Fig. 6.

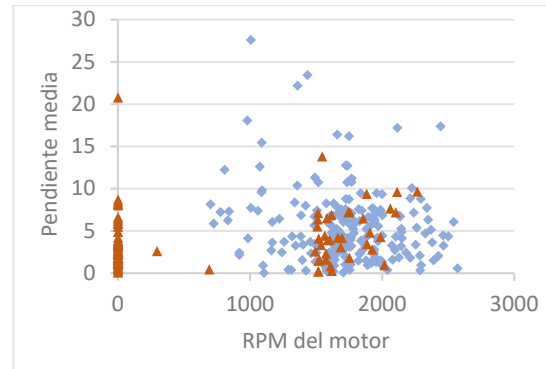


Figura 6. Comparación de RPM del motor híbrido y el motor de combustión interna en pendientes ascendentes. Fuente propia.

En pendientes ascendentes el vehículo de combustión presentó valores alrededor de 2400 RPM mientras que el híbrido 2100 ya que sus dos motores trabajan al mismo tiempo cuando requiere mayor potencia, se reduce el consumo de combustible y las emisiones contaminantes producidas por el motor a gasolina.

Al emplear un modelo de regresión múltiple con RStudio se determinó que el IRI y la pendiente de la vialidad tienen un efecto significativo en las RPM del motor, y estas en el consumo de combustible al aumentar el flujo. Del modelo de regresión se obtuvieron los factores por los que se ve afectado el flujo de combustible por unidad de cada variable, el valor de R^2 es de 0.8268 lo que significa que se puede estimar el 82.7% de la variabilidad del flujo de combustible, las variables presentaron buena significancia estadística al tener un valor T de Student de $2 \cdot 10^{-16}$.

La Fig. 7 muestra la relación que hay entre el flujo de combustible en un vehículo de combustión y las RPM del motor, los colores representan el rango del IRI en el cual se dio la medición.

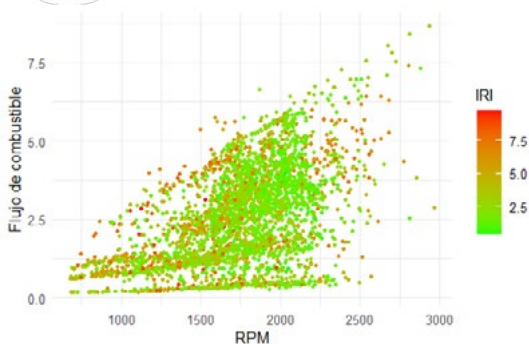


Figura 7. Flujo de combustible contra las RPM del motor de combustión clasificados por el IRI. Fuente propia.

Hay una diferencia notoria en el flujo de combustible entre el vehículo de combustión y el híbrido como se puede ver en la Fig. 8, cuando el motor eléctrico tiene la capacidad de mantener en movimiento al vehículo, el de combustión deja de funcionar reduciendo las RPM a cero y por consecuencia, las emisiones contaminantes.

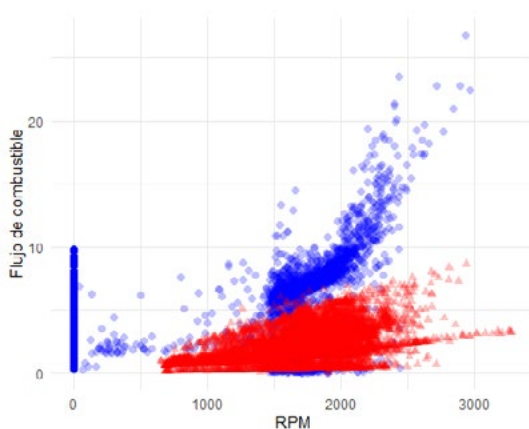


Figura 8. Flujo de combustible contra RPM de los motores de combustión en color rojo y los motores híbridos en color azul. Fuente: propia.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que la pendiente longitudinal afecta en mayor medida que el índice de rugosidad internacional al consumo de combustible ya que en pendientes mayores al 8% las revoluciones por minuto del motor

incrementan por encima de los 2400 RPM para vehículos de combustión, sin embargo, en vehículos híbridos no sucede lo mismo ya que al tener dos motores, uno eléctrico y el otro de combustión, se consume menos gasolina y genera menor cantidad de CO₂ el cual afecta al medio ambiente con el efecto invernadero. La cantidad de vehículos para las pruebas resulta una limitante para incrementar los datos recopilados y así analizar la relación entre la pendiente y el IRI con el consumo de combustible. Se espera tener una mayor cantidad de datos para poder realizar análisis con mayor detalle ya que con esta información se puede detonar diversos estudios como el costo de operación vehicular para ciertas características de pavimento y sus módulos de calibración para los vehículos utilizados.

Referencias

- [1] X. Zhang, X. Chen, and X. Zhang, "The impact of exposure to air pollution on cognitive performance," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, p. 201809474, Aug. 2018, doi: 10.1073/pnas.1809474115.
- [2] J. Yang, Y. Zhao, J. Cao, and C. P. Nielsen, "Co-benefits of carbon and pollution control policies on air quality and health till 2030 in China," *Environ Int*, vol. 152, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.envint.2021.106482.
- [3] G. Chen *et al.*, "Long-term exposures to ambient PM₁ and NO₂ pollution in relation to mild cognitive impairment of male veterans in China," *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 2, Feb. 2021, doi: 10.1088/1748-9326/abde5c.
- [4] T. Vandyck, K. L. Ebi, D. Green, W. Cai, and S. Vardoulakis, "Climate change, air pollution and human health," Oct.

- 01, 2022, *Institute of Physics*. doi: 10.1088/1748-9326/ac948e.
- [5] S. O. Showers and A. K. Raji, "Benefits of Electric Vehicle as Mobile Energy Storage System," *2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pp. 1–5, 2020, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:222419881>
- [6] P. Fedotov, "Exchanges: The Interdisciplinary Research Journal 43 Fedotov."
- [7] B. Shaukat N. and Khan, "E-Mobility: Transportation Sector in Transition," in *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, B. and C. W.-Y. Lackner Maximilian and Sajjadi, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 2423–2498. doi: 10.1007/978-3-030-72579-2_130.
- [8] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "<https://www.inegi.org.mx/programas/vehiculosmotor/>," Vehículos de Motor Registrados en Circulación (VMRC).
- [9] Thawat. Watanatada, "The highway design and maintenance standards model /," p. 2 v., 1987, [Online]. Available: <http://digitallibrary.un.org/record/23540>
- [10] O. Ghaffarpasand and F. D. Pope, "Telematics data for geospatial and temporal mapping of urban mobility: Fuel consumption, and air pollutant and climate-forcing emissions of passenger cars," *Science of the Total Environment*, vol. 894, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164940.
- [11] K. H. Ko *et al.*, "An Economic Calibration Method for Fuel Consumption Model in HDM4," *Wirel Pers Commun*, vol. 89, no. 3, pp. 959–975, Aug. 2016, doi: 10.1007/s11277-016-3353-2.
- [12] U. S. Yogesh, S. S. Jain, and T. Devesh, "Adaptation of HDM-4 Tool for Strategic Analysis of Urban Roads Network," in *Transportation Research Procedia*, Elsevier B.V., 2016, pp. 71–80. doi: 10.1016/j.trpro.2016.11.062.
- [13] C. A. Cameron and J. Christie, "INNOVATIVE MEANS OF COLLECTING INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX USING SMARTPHONETECHNOLOGY," 2014.

Inteligencia Artificial Aplicada a la Detección de Glaucoma en Tomografías de Coherencia Óptica: Una Revisión

Artificial Intelligence Applied to Glaucoma Detection in Optical Coherence Tomography: A Review

Castillo-Rocha, Oliverio. Alfonso-Francia, Gendry. Quintana-Quintana J. Oliver.

Facultad de Ingeniería.

Universidad Autónoma de Querétaro.

Querétaro, México.

oliderak@hotmail.com

Palabras clave: IAR, Glaucoma, OCT, Inteligencia Artificial, Detección. Revisión de Técnicas de Inteligencia Artificial para la Detección de Glaucoma en Tomografías de Coherencia Óptica

Resumen- El Glaucoma es un padecimiento degenerativo que afecta a gran parte de la población mundial representa un gran reto el pronto diagnóstico y por consecuente tratamiento de este. La inteligencia artificial se ha vuelto una herramienta revolucionaria en el área de análisis de imágenes médicas, por lo tanto, la conjunción de estos dos tópicos mediante el aprendizaje profundo promete mejorar la calidad de los diagnósticos. En el presente artículo, se presenta una revisión del estado del arte de aplicaciones de técnicas de aprendizaje profundo para detectar distintos tipos de indicadores de Glaucoma en OCT, así como se analiza el propósito, los resultados obtenidos y las métricas reportadas para realizar una comparativa objetiva.

Keywords: IAR, Glaucoma, OCT, Artificial Intelligence, Detection.

Abstract- Glaucoma is a degenerative disease that affects a large part of the world's population. Early diagnosis and, consequently, treatment of it represents a great challenge, but the Artificial intelligence has become a revolutionary tool in the area of medical image analysis, therefore, the conjunction of these two topics through deep learning promises to improve the precision of diagnoses. In this article, a review of the state of the art of applications of deep learning techniques to detect Glaucoma indicators in OCTs is presented, as well as the purpose, the results obtained and the metrics reported to make an objective comparison.

1. Introducción

A. Glaucoma y su impacto

El Glaucoma causa número uno de ceguera irreversible y la segunda de ceguera reversible, se estimó que en el 2013 aproximadamente 64.3 millones de personas eran afectadas por esta enfermedad, y en el 2020 más de 70 millones de personas presentaban dicha afección [1].

Este padecimiento consta de un trastorno crónico, progresivo y degenerativo que causa daño en el campo visual [1], y más

comúnmente es generado por la acumulación de fluido en la parte delantera del ojo, de modo que se incrementa la presión en el mismo y ocurre daño en el nervio óptico [2].

Tratar con esta enfermedad resulta complicado, dado que usualmente los pacientes son asintomáticos hasta que la enfermedad se encuentra en una etapa avanzada, por lo tanto, muchos de los pacientes permanecen sin diagnóstico [2]. Los síntomas que se presentan en etapas avanzadas incluyen la aparición de secciones borrosas en el campo visual, principalmente en la visión periférica; en una etapa final el campo de visión se torna borroso o completamente

oscuro, lo cual desencadena en una pérdida total de la visión [3]. Una dificultad que se enfrenta es que no existe un método eficiente en términos de tiempo y a una escala poblacional grande en México para la detección de glaucoma, así como se pueden presentar fallas en los tratamientos farmacológicos por no tener un diagnóstico en una etapa temprana que ocasiona una respuesta insuficiente al tratamiento [4].

B. Tomografía de coherencia óptica

La Tomografía de Coherencia Óptica (*OCT*) Fig. 1 es una técnica de imagen sin contacto que genera imágenes transversales de tejido con alta resolución [5]. Dado que es una técnica no invasiva, se convierte en una herramienta fundamental para diagnosticar enfermedades oculares [6], tales como glaucoma. Sin embargo, también se puede utilizar para asistir al diagnóstico de degeneración macular y la retinopatía diabética [10].

Es utilizada en oftalmología, proporciona una vista detallada de la retina, medición del grosor de la capa de fibras nerviosas y evaluación de la mácula. El principio de funcionamiento Fig. 2 es con luz infrarroja de modo que, mediante la interferometría de baja coherencia, el haz se divide en dos, uno en dirección a la zona de interés y el otro a un espejo que es utilizado como referencia; por lo tanto, las diferencias entre las longitudes de onda forman patrones de interferencia los cuales recrean la imagen del tejido [5].

C. Inteligencia artificial aplicada en oftalmología

Las técnicas tradicionales de detección de glaucoma en OCT se basan en la morfología del nervio óptico y la observación de la RNFL [7], por lo tanto, las limitaciones y desafíos están sujetos al juicio del especialista, falta de capacidad de procesamiento de grandes cantidades de datos, precisión limitada de los especialistas, así como se enfrenta a una falta en el análisis progresivo [8].

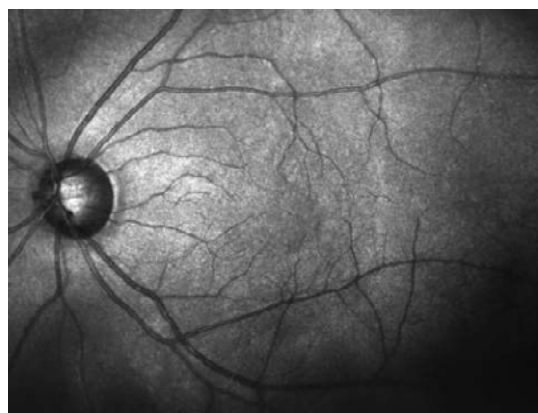


Figura 1. Imagen de Tomografía de Coherencia Óptica [21].

La inteligencia artificial (IA) implica de manera inherente el uso de computadoras, dado que se busca simular la capacidad del humano de aprender, realizar tareas y de manera intrínseca aprovechar estas capacidades [11]. Su introducción revolucionaria en oftalmología se debe a la capacidad de mejorar el diagnóstico

monitoreo y tratamiento de enfermedades oculares, puesto que se busca obtener una detección más precisa y temprana [10].

La importancia en el caso del glaucoma, es porque se utiliza para analizar imágenes de *OCT*, dado que se puede medir el grosor de la capa de fibras nerviosas de la retina (*RNFL*) y la capa de células ganglionares.

Los algoritmos de Aprendizaje Profundo (*DL* por sus siglas en inglés) tienen una gran capacidad de detectar glaucoma mediante el análisis de lesiones estructurales visibles en las *OCT*, sin embargo, el uso de IA no se limita al glaucoma, también es útil en diagnóstico automatizado, sugerencia de intervenciones quirúrgicas, así como optimizar el flujo y monitoreo en hospitales y clínicas [11].

2. Cuerpo

A. Metodología

En esta revisión sobre la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en la detección de

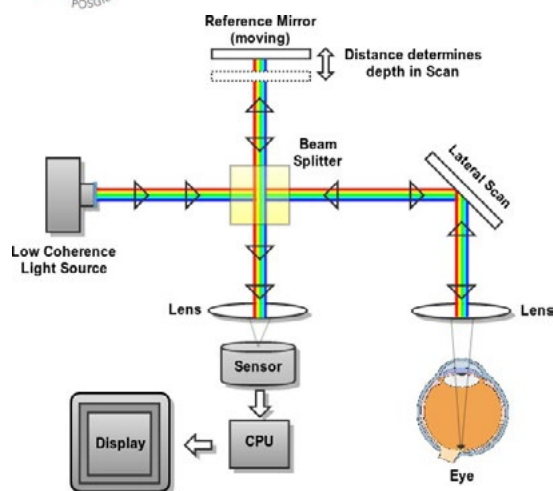


Figura 2. Esquema de OCT [26].

glaucoma en imágenes de *OCT*, se realizó desde la búsqueda hasta el análisis de calidad de los estudios elegidos, tal como se detalla a continuación.

a) Búsqueda

Se realizó la búsqueda en bases de datos electrónicas, las cuáles fueron: PubMed, Science Direct, Springer, MDPI y IEEE Xplore, utilizando un rango de tiempo que va desde el 2008 al 2024 y palabras claves en español e inglés, tales como:

- Glaucoma
- OCT
- Artificial Intelligence
- Deep Learning

b) Selección y exclusión

Como primer filtro se seleccionaron artículos con la fecha descrita en la sección anterior, de carácter descriptivo del glaucoma, estudios donde se aplicaron técnicas de inteligencia artificial para la detección de glaucoma en imágenes de *OCT*, en los idiomas español e inglés y los cuales reportaran las métricas propias de los modelos de *DL*.

No se consideraron artículos para los cuales no se pudiera tener el acceso completo al estudio, así como publicaciones que no involucraran

aplicaciones directas de técnicas de inteligencia artificial.

Posteriormente los estudios seleccionados fueron revisados en su totalidad para verificar la existencia de discrepancias, así como validar el contenido de estos mismos.

c) Datos extraídos

De los artículos que fueron tomados en cuenta para esta revisión se extrajeron los datos de información bibliográfica, objetos y preguntas del estudio, técnicas de inteligencia artificial aplicadas en el estudio, procedimiento, resultados obtenidos, hallazgos, así como conclusiones de los mismo.

Los estudios considerados para este artículo toman una variedad de conjunto de datos, principalmente bases públicas de SD-OCT para capturar detalles estructurales en distintas configuraciones, con imágenes de Stanford, California, Hong Kong, India, Nepal además del Estudio Ocular Chino Americano y datos obtenidos en Singapur, de modo que al momento de evaluar distintos conjuntos de datos se tiene una perspectiva de representación diversa en pacientes con el fin de proporcionar una mayor robustez en la evaluación de modelos en distintos grupos geográficos y étnicos, así como distintas estructuras de interés.

d) Análisis de la información

Debido a la heterogeneidad en las metodologías y métricas utilizadas en los estudios, se optó por un análisis narrativo en lugar de un metaanálisis cuantitativo, así como se elaboró una tabla para resumir y visualizar:

- Las características generales de los estudios incluidos.
- Las técnicas de IA aplicadas y sus especificaciones técnicas.
- Los resultados de las métricas de rendimiento diagnósticas.

Se discutieron las tendencias observadas, las fortalezas y debilidades de los enfoques utilizados, y se identificaron áreas comunes de desafío y oportunidades para futuras investigaciones.

B. Desarrollo

a) Detección de glaucoma mediante inteligencia artificial en OCT

En la detección de glaucoma utilizando imágenes de OCT, se emplean modelos propios del Deep Learning, dado que se permite encontrar cambios en la estructura de la retina y el nervio óptico mediante su capacidad de segmentar de manera precisa las capas retinianas y aprender características de las mismas [13]. Las redes neuronales convolucionales (CNN) son ampliamente utilizadas para la extracción de características en imágenes. Modelos como *VGGNet*, *ResNet*, *Inception* son arquitecturas basadas en *CNNs*, las cuales pueden ser adaptadas para la clasificación de imágenes de OCT y realizar detección de patrones indicativos de Glaucoma [13], así como la inclusión de transferencia de aprendizaje (*transfer learning*) dónde se toma un modelo preentrenado con un gran número de imágenes y se realiza un ajuste para función en específica [14]. Los modelos de segmentación que emplean la arquitectura U-Net (basada en *CNNs*) son muy utilizados en segmentación de

imágenes para aplicaciones médicas, de modo que la versión clásica de U-Net es la más utilizada para segmentar las capas de la retina y el nervio óptico. Sin embargo, existen variantes como *Attention U-Net* que mejora la precisión de la segmentación mediante mecanismos de atención o *Dense U-Net* que incluye conexiones densas [15]. Cabe destacar la utilización de Redes Generativas Adversariales (GANs), estas mismas se utilizan para mejorar la calidad de las imágenes de OCT y generar nuevos datos para el entrenamiento de un modelo, es decir un *data augmentation* [13]. Es evidente que el usar un modelo de DL proporciona un mayor rendimiento en la clasificación y segmentación de imágenes médicas, dado que no se necesita realizar una extracción manual de las características para aprenderlas.

b) Revisión de estudios

La detección temprana y precisa, así como el seguimiento de un padecimiento como lo es glaucoma marca una gran diferencia entre la ceguera y el retraso de esta condición, por lo tanto, como se ha mencionado anteriormente, las técnicas basadas en IA, así como DL marca una pauta para poder mejorar dicho objetivo. La Tabla 1 enumera los estudios utilizados para conocer los modelos de DL, ¿qué se buscaba? Así como los resultados para posteriormente realizar la discusión de los mismos.

Tabla 1. Características de los estudios revisados.

Autor	Modelo	Propósito	Resultados
Ran et al [17].	ResNet	Detección de glaucoma y características miopes a partir de escaneos volumétricos	AUC-ROC 0.949 0.890-0.950 validación interna/externa.
Thompson AC et al [18].	ResNet-34	Detección sin segmentación, reducir el impacto del error en la medición del grosor de la RNFL	AUC-ROC 0.96 sin segmentación vs 0.87 segmentando
Xue S et al [12].	CTS-Net basada en CSWin Transformer	Segmentación de capas retinianas, para medir la	MAD 1.79 píxeles, RMSE 2.15 píxeles y DSC del 0.927

reducción del grosor de la RNFL.			
Hussain R et al [19].	U-Net y Transformer	Segmentación del disco óptico y copa óptica.	AUC-ROC 0.984 validación externa
Gende M et al [20].	MGU-Net	<i>Transfer learning</i> para la segmentación de las capas retinianas	DSC de 0.87 ± 0.08 segmentación de estructuras esenciales
Noury E et al [21].	DiagFind	Detección en distintas etnias, mediante el análisis de mapas de saliencia que destacan áreas para la clasificación	AUC-ROC [0.80, 0.94] depende del grupo étnico. Detección en ausencia de defectos en campo visual ROC 0.76.
Medeiros FA et al [22].	M2M basado en ResNet50	Predicción del grosor de la RNFL para detectar cambios que indiquen presencia de glaucoma	AUC-ROC 0.86 progresión-no progresión del Glaucoma. AUC-ROC 0.96 cuando la pérdida de la RNFL > 2mm por año.
Olivas LG et al [14].	MobileNet e Inception V3 con Transfer Learning	Mapas de grosor de la RNFL para detectar glaucoma en población latina	MobileNet 90% de precisión, 90 de sensibilidad y F1 score 90%. Inception V3 90% de precisión, 90 de sensibilidad y F1 score 90%.
Hao et al [23].	ResNet + LSTM	Clasificación del ángulo cerrado utilizando videos de AS-OCT	AUC-ROC de 0.905 y 0.919 respectivamente
Devalla SK et al [24].	CNN	Segmentación basada en 3D CNNs inspirado en 3D U-Net. Mejorar la precisión en la segmentación del tejido óptico	DSC promedio para todas las capas de tejido 0.93 ± 0.02 Sensibilidad 0.94 ± 0.02
Abdul Md et al [25].	Y-Net	Estimación de bordes para segmentación	Especificidad 0.99 Redujo la cantidad de datos necesarios para el entrenamiento. DSC 0.99

3. Resultados y discusión

Se consideraron 11 estudios recientes para la evaluación de las técnicas utilizadas, de modo

que se presenta en la Tabla 1, los modelos de *Deep Learning* son clave en la asistencia para la detección de patrones indicativos de Glaucoma en OCT, destacando los modelos

ResNet con sus distintas variaciones [18], [22], modelos basados en CNNs como U-Net [19], Y-Net [25], MGU-Net [20], así como la inclusión de modelos como LSTM [23] y Transformers [19]. En comparativa el modelo ResNet [17], ResNet-34, M2M basado en ResNet-50 [22] y Res-Net + LSTM obtuvieron un valor para AUC-ROC de 0.949, 0.96, 0.86, 0.919 respectivamente, esta métrica utilizada para evaluación de modelos de clasificación nos indica que, al estar entre este rango de valores, hay una capacidad excelente para clasificar correctamente los positivos y los negativos a la correspondencia de clase [30], así como la segmentación permite delimitar con precisión la RNFL y otras capas de la retina para poder identificar variaciones en el grosor de la misma o áreas anormales, crucial para un diagnóstico temprano así como progresión de la enfermedad una vez detectada, así como segmentar nos proporciona un análisis cuantitativo de los datos y objetividad sobre el grosor promedio, variabilidad permitiendo una mejor toma de decisiones clínicas además de una comparativa entre otros pacientes, sanos o no sanos para incrementar bases de datos que contribuyen a este tipo de análisis.

Otro modelo de segmentación de capas retinianas es el *CTS-Net* basada en *CSW Transformers*, lo cual permite extraer características relevantes en distintos canales de entrada, utilizando mecanismos de atención para el procesamiento de datos secuenciales, por lo que se reportan [17] un valor de distancia media absoluta (MAD) de 1.79 píxeles, es decir una predicción buena de donde se encuentren las capas. Un RMSE de 2.15 píxeles, lo cual indica que el modelo está realizando una buena segmentación dado el contexto de la imagen (tamaño), así como un DSC de 0.927 lo cual indica que el modelo está realizando con gran precisión las estructuras de interés, en este caso la RNLF, con una

correspondencia de 92.7% en superposición al trabajo de un experto.

Al combinar los modelos de U-Net y Transformers [19] para la segmentación del disco óptico y la copa óptica, se logró precisar de gran manera la relación entre el aumento de del tamaño copa-disco, tal que se reporta un AUC-ROC de 0.984, como anteriormente se mencionó, este valor permite decir sobre una excelente capacidad en clasificación binaria pixel por pixel. Otro enfoque se toma es el modelo basado en U-Net añadiendo módulos de razonamiento global en múltiples escalas, lo cual adquiere relaciones globales en la imagen, MGU-Net, con un DSC de 0.85 lo cual, es un buen indicador, sin embargo, no es tan eficiente si lo comparamos con otros estudios ya revisados.

La utilización *transfer learning* [14] también es una buena opción, dado que los modelos *MobileNet* e *Inception V3* primero fueron entrenados con el *dataset ImageNet* y luego se usó ajuste fino (*fine-tuning*) para adaptar los modelos para la clasificación de imágenes del mapa del grosor de la RNFL, de modo que se reporta un rendimiento ligeramente mayor de *Inception V3* respecto a *MobileNet*.

4. Conclusiones

Un seguimiento y detección temprana puede hacer la diferencia en el tratamiento del Glaucoma. La aplicación de DL en los conjuntos de OCT ha mostrado una gran eficiencia, sin embargo, existen bastantes retos por enfrentar para poder mejorar su implementación tales como estandarización de datos, etiquetado de datos o diferenciación étnica.

Se presenta el estado del arte actual en la investigación que utiliza *DL* para detectar patrones de glaucoma en *OCT*, las cuales son bastante usadas para recolectar datos oftalmológicos. Usando arquitecturas como *ResNet*, *U-Net*, *Inception* y otras basadas en

CNNs se puede explorar de manera profunda la extracción de características en imágenes.

La segmentación de la RNFL es relevante en el diagnóstico temprano, dada la reducción en el grosor de la misma es un indicador de la enfermedad mediante la diferenciación de otras capas de la retina, los daños en esta capa pueden ocurrir antes de presentarse síntomas como el deterioro del campo visual o daño de nervio óptico, así como indicar la progresión de la enfermedad o el avance del tratamiento. En comparación con la segmentación del disco óptico y nervio óptico, donde los daños perceptibles aparecen en etapas más avanzadas de la enfermedad. De lo anterior los dos modelos que entregan mejores resultados es el basado en la arquitectura *CTS-Net* basada en puesto que sus predicciones se asemejan en gran manera a las de un experto al momento de realizar la validación cruzada, así como el modelo M2M tiene la capacidad de identificar con gran precisión cambios pequeños en la RNFL. Estos modelos podrían ser mejorados en un futuro aplicando técnicas de ajuste de hiperparámetros en las arquitecturas, entrenamientos, procesamiento de datos y funciones de pérdida. Cabe destacar que el desarrollo de las tecnologías que impliquen el uso de inteligencia artificial con aplicaciones médicas conduce a la realización de nuevas infraestructuras para la implementación en el mundo real, las cuales influyen directamente en la calidad de vida de las personas con alguna afección ocular.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por los recursos otorgados en la realización de los estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma de Querétaro. A la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería, así como a los académicos y profesores de la Maestría en Ciencias en Inteligencia Artificial.

Referencias

- [1] Tham YC, Li X, Wong TY, Quigley HA, Aung T, Cheng CY. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology*. 2014 Nov;121(11):2081-90. doi: 10.1016/j.ophtha.2014.05.013.
- [2] Jayaram H, Kolko M, Friedman DS, Gazzard G. Glaucoma: now and beyond. *Lancet*. 2023 Nov 11;402(10414):1788-1801. doi: 10.1016/S0140-6736(23)01289-8. Epub 2023 Sep 21. PMID: 37742700.
- [3] Schacknow, P. N., & Samples, J. R. (2010). *Glaucoma*. Springer
- [4] García Luna Martínez Socioeconomic impact of primary open angle Glaucoma in Mexico.. *Rev Mex Oftalmol*. 2015.
- [5] Aumann S, Donner S, Fischer J, Müller F. Optical coherence tomography (OCT): principle and technical realization. 2019 Aug 14. In: Bille JF, editor. *High Resolution Imaging in Microscopy and Ophthalmology: New Frontiers in Biomedical Optics* [Internet]. Cham (CH): Springer; 2019. Chapter 3. PMID: 32091846.
- [6] Asrani, S. F. (2023). Monitoring glaucoma progression with OCT. *Review of Ophthalmology*.
- [7] Moghimi, S., SafiZadeh, M., Camp, A., Weinreb, R.N. (2021). OCT and Glaucoma: Case Review. In: Mohammadpour, M. (eds) *Diagnostics in Ocular Imaging*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54863-6_26
- [8] Lommatzsch, C.; van Oterendorp, C. Current Status and Future Perspectives of Optic Nerve Imaging in Glaucoma. *J. Clin. Med*. 2024, 13, 1966. <https://doi.org/10.3390/jcm13071966>
- [9] Keskinbora K, Güven F. Artificial intelligence and Ophthalmology. *Turk J Ophthalmol*. 2020 Mar 5;50(1):37-43. doi: 10.4274/tjo.galenos.2020.78989. PMID: 32167262; PMCID: PMC7086098.
- [10] Li JO, Liu H, Ting DSJ, Jeon S, Chan RVP, Kim JE, Sim DA, Thomas PBM, Lin H, Chen Y, Sakamoto T, Loewenstein A, Lam DSC, Pasquale LR, Wong TY, Lam LA, Ting DSW. Digital technology, tele-medicine and artificial intelligence in ophthalmology: A global perspective. *Prog Retin Eye Res*. 2021 May;82:100900. doi: 10.1016/j.preteyeres.2020.100900. Epub 2020 Sep 6. PMID: 32898686; PMCID: PMC7474840.
- [11] Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4.a ed.). Pearson.
- [12] Xue S, Wang H, Guo X, Sun M, Song K, Shao Y, Zhang H, Zhang T. CTS-Net: a segmentation network for Glaucoma optical coherence tomography retinal layer images.

- Bioengineering (Basel). 2023 Feb 8;10(2):230. doi: 10.3390/bioengineering10020230. PMID: 36829724; PMCID: PMC9952657.
- [13] Li D, Ran AR, Cheung CY, Prince JL. Deep learning in optical coherence tomography: where are the gaps? *Clin Exp Ophthalmol*. 2023 Nov;51(8):853-863. doi: 10.1111/ceo.14258. Epub 2023 May 28. PMID: 37245525; PMCID: PMC10825778.
- [14] Olivas LG, Alférez GH, Castillo J. Glaucoma detection in Latino population through OCT's RNFL thickness map using transfer learning. *Int Ophthalmol*. 2021 Nov;41(11):3727-3741. doi: 10.1007/s10792-021-01931-w. Epub 2021 Jul 1. PMID: 34212255.
- [15] N. S., J.S., Emmanuel, W.R.S. Glaucoma stage classification using UNET-based segmentation with multiple feature extraction technique. *Multimed Tools Appl* 83, 74955–74971 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18243-7>
- [16] Ran, A. R., Tham, C. C., Chan, P. P., Cheng, C. Y., Tham, Y. C., Rim, T. H., & Cheung, C. Y. (2021). Deep learning in glaucoma with optical coherence tomography: a review. *Eye (London, England)*, 35(1), 188–201. <https://doi.org/10.1038/s41433-020-01191-5>
- [17] Ran, A. R., Wang, X., Chan, P. P., Chan, N. C., Yip, W., Young, A. L., et al. (2022). Three-dimensional multi-task deep learning model to detect glaucomatous optic neuropathy and myopic features from optical coherence tomography scans: A retrospective multi-centre study. *Front. Med. (Lausanne)* 9, 860574. doi:10.3389/fmed.2022.860574
- [18] Thompson AC, Jammal AA, Berchuck SI, Mariottoni EB, Medeiros FA. Assessment of a segmentation-free deep learning algorithm for diagnosing glaucoma from optical coherence tomography scans. *JAMA Ophthalmol*. 2020 Apr 1;138(4):333-339. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2019.5983. PMID: 32053142; PMCID: PMC7042899.
- [19] Hussain, Rukshanda, and Hritam Basak. "UT-Net: Combining U-Net and Transformer for Joint Optic Disc and Cup Segmentation and Glaucoma Detection." *arXiv preprint arXiv:2303.04939* (2023).
- [20] Gende M, de Moura J, Fernández-Vigo JI, Martínez-de-la-Casa JM, García-Feijóo J, Novo J, Ortega M. Robust multi-view approaches for retinal layer segmentation in glaucoma patients via transfer learning. *Quant Imaging Med Surg*. 2023 May 1;13(5):2846-2859. doi: 10.21037/qims-22-959. Epub 2023 Mar 9.
- [21] Noury E, Mannil SS, Chang RT, Ran AR, Cheung CY, Thapa SS, Rao HL, Dasari S, Riyazuddin M, Chang D, Nagaraj S, Tham CC, Zadeh R. Deep learning for glaucoma detection and identification of novel diagnostic areas in diverse Real-World Datasets. *Transl Vis Sci Technol*. 2022 May 2;11(5):11. doi: 10.1167/tvst.11.5.11. PMID: 35551345; PMCID: PMC9145034.
- [22] Medeiros, F. A., Jammal, A. A., & Mariottoni, E. B. (2021). Detection of Progressive Glaucomatous Optic Nerve Damage on Fundus Photographs with Deep Learning. *Ophthalmology*, 128(3), 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2020.07.045>
- [23] Hao, L., Hu, Y., Xu, Y. et al. Dynamic analysis of iris changes and a deep learning system for automated angle-closure classification based on AS-OCT videos. *Eye and Vis* 9, 41 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40662-022-00314-1>
- [24] Devalla SK, Pham TH, Panda SK, Zhang L, Subramanian G, Swaminathan A, Yun CZ, Rajan M, Mohan S, Krishnadas R, Senthil V, De Leon JMS, Tun TA, Cheng CY, Schmetterer L, Perera S, Aung T, Thiéry AH, Girard MJA. Towards label-free 3D segmentation of optical coherence tomography images of the optic nerve head using deep learning. *Biomed Opt Express*. 2020 Oct 15;11(11):6356-6378. doi: 10.1364/BOE.395934. PMID: 33282495; PMCID: PMC7687952.
- [25] Abdu Md Kadir, Hasan Md Tusfiqur Alam, and Daniel Sonntag. 2023. EdgeAL: An Edge Estimation Based Active Learning Approach for OCT Segmentation. In *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2023: 26th International Conference, Vancouver, BC, Canada, October 8–12, 2023, Proceedings, Part II*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 79–89. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43895-0_8
- [26] Cabaleiro P, de Moura J, Novo J, Charlón P, Ortega M. Automatic Identification and Representation of the Cornea–Contact Lens Relationship Using AS-OCT Images. *Sensors*. 2019; 19(23):5087. <https://doi.org/10.3390/s19235087>
- [27] Kang JM, Tanna AP. Glaucoma. *Med Clin North Am*. 2021 May;105(3):493-510. doi: 10.1016/j.mcna.2021.01.004. Epub 2021 Apr 2. PMID: 33926643.
- [28] Drexler, W., & Fujimoto, J. G. (2008). Optical coherence tomography—principles and applications. *Reports on Progress in Physics*, 71 (4), 046601
- [29] Popescu Patoni SI, Muşat AAM, Patoni C, Popescu MN, Munteanu M, Costache IB, Pîrvulescu RA, Muşat O. Artificial intelligence in ophthalmology. *Rom J Ophthalmol*. 2023 Jul-Sep;67(3):207-213. doi: 10.22336/rjo.2023.37. PMID: 37876505; PMCID: PMC10591433.
- [30] Abràmoff, M. D., Lavin, P. T., Birch, M., Shah, N., & Folk, J. C. (2018). "Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices." *NPJ Digital Medicine*, 1, 39. doi:10.1038/s41746-018-0040-6

Polímeros Hidrofóbicos en Asfaltos Modificados: Revisión de Estudios y Perspectivas de Aplicación

Hydrophobic Polymers in Modified Asphalts: Review of Studies and Application Perspectives

Autores: Vizcaino Rodríguez, Orlinka Yineth

Afiliación: Facultad de Ingeniería.

Nombre de la Universidad u Organización Universidad Autónoma de Querétaro.

Ciudad y País: Querétaro, México.

Correo electrónico ovizcaino31@alumnos.uaq.mx

Palabras clave: VTM, pavimentos asfálticos, daño por humedad, polímeros hidrofóbicos

Resumen-

El daño por humedad es una causa principal del deterioro prematuro en pavimentos asfálticos, manifestándose como pérdida de propiedades mecánicas y separación entre asfalto y agregado. Esta revisión bibliográfica se enfoca en los polímeros hidrofóbicos utilizados para modificar asfaltos como solución a este problema. Estos polímeros reducen la absorción de agua y mejoran la adherencia asfalto-agregado, aumentando la durabilidad del pavimento. Se examinan diversos tipos de polímeros hidrofóbicos, sus mecanismos de acción y su efectividad en diferentes condiciones. La implementación de estos polímeros en el diseño y tratamiento de mezclas asfálticas promete pavimentos más resistentes a condiciones ambientales adversas, ofreciendo una solución sostenible al daño por humedad.

Keywords: VTM, asphalt pavements, moisture damage, hydrophobic polymers

Abstract-

Moisture damage is a major cause of premature deterioration in asphalt pavements, manifesting as loss of mechanical properties and separation between asphalt and aggregate. This literature review focuses on hydrophobic polymers used to modify asphalts as a solution to this problem. These polymers reduce water absorption and improve asphalt-aggregate adhesion, increasing pavement durability. Various types of hydrophobic polymers, their mechanisms of action, and their effectiveness under different conditions will be examined. The implementation of these polymers in the design and treatment of asphalt mixtures promises pavements that are more resistant to adverse environmental conditions, offering a sustainable solution to moisture damage.

1. Introducción

En los últimos cincuenta años, la infraestructura de transporte ha experimentado un desarrollo significativo, especialmente en la construcción de carreteras, para hacer frente al aumento del tráfico impulsado por el crecimiento económico y productivo de los países. La calidad de las carreteras es fundamental para optimizar la eficiencia del transporte [1].

El asfalto ha sido el material predominante en la construcción de carreteras durante décadas, siendo considerado tradicionalmente como impermeable y poco reactivo ante factores externos. Sin embargo, el agua puede contener elementos como oxígeno y otros compuestos que alteran las propiedades químicas y físicas del asfalto a largo plazo, especialmente en mezclas donde la interfaz entre el ligante y el agregado es delgada [2].

La presencia de agua reduce la resistencia en la interfaz entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo, lo que provoca un aumento en la acumulación de deformaciones permanentes debido a la pérdida de cohesión en la mezcla. Este fenómeno, conocido como stripping, ha sido documentado desde los años treinta y se atribuye a reacciones químicas entre el asfalto y el agregado [3], [4].

Para mejorar la resistencia al agua de las mezclas asfálticas, se utilizan aditivos

antistripping o mejoradores de adherencia. Los polímeros modificados son herramientas eficaces para abordar problemas de deterioro, ya que deben transferir sus propiedades al sistema polímero-asfalto y alterar las características reológicas del asfalto virgen [5].

Además, se recomienda el uso de tecnologías emergentes como revestimientos hidrofóbicos para contrarrestar los efectos del agua sobre el hormigón asfáltico [6].

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo principal realizar una revisión de los estudios más recientes sobre la aplicación de polímeros hidrofóbicos en asfaltos modificados.

2. Polímeros modificadores

Los métodos de modificación del asfalto mediante polímeros son comúnmente empleados para mejorar la calidad de asfaltos que, por sí solos, no son adecuados para ciertas aplicaciones. Esto se debe a su alta susceptibilidad a las variaciones de temperatura, su propensión a oxidarse prematuramente o su elevado contenido de compuestos saturados y aromáticos [7].

Los polímeros elastoméricos, como el SBS (estireno-butadieno-estireno), son muy valorados por su capacidad para mejorar la elasticidad y la resistencia al envejecimiento [8]. Por otro lado, otros polímeros como el

EVA (etileno-vinil-acetato) ofrecen una mayor estabilidad térmica y resistencia a las deformaciones permanentes [9]. En el caso de los polímeros hidrofóbicos, como el polietileno clorado (CPE) o las resinas de siloxano, destacan por su habilidad para disminuir la absorción de agua y mejorar la adherencia entre el asfalto y los agregados, lo que resulta esencial en entornos húmedos.

De igual manera, el politetrafluoroetileno (PTFE), con nanopartículas como óxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO), óxido de calcio (CaO), se han aplicado sobre mezclas asfálticas para mejorar la seguridad vial; midiendo el coeficiente de fricción para caracterizar la resistencia al deslizamiento de las superficies recubiertas superhidrofóbicas [10].

Los polímeros hidrofóbicos actúan como aditivos que repelen el agua y, al ser incorporados al asfalto, incrementan considerablemente su resistencia a la humedad. Según [6] se entiende por material hidrofóbico a los empleados en recubrimientos para los que el ángulo de contacto con el agua y las soluciones acuosas es superior a 90° .

[11] Argumenta que una superficie es hidrofóbica cuando las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua son mayores que las fuerzas adhesivas entre el agua y la superficie. En este caso, el agua asume la

forma energéticamente eficiente de una esfera, como se muestra en la figura 1.

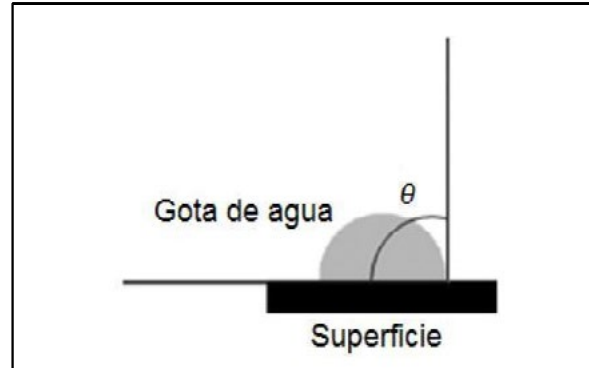


Figura 1: Representación del ángulo de contacto θ entre la gota de agua y la superficie. Fuente:[12]

Según [13], la humectabilidad se describe mediante un proceso termodinámico. En el caso de superficies hidrófobas el proceso no es espontáneo como en el caso de las hidrofílicas debido a que la energía libre de la interfaz seca es menor que la de la interfaz húmeda [14]. La humectabilidad está relacionada con la rugosidad de la superficie. El aumento de la rugosidad eleva el ángulo de contacto de la superficie (CA) entre las gotas de agua y la superficie del material, lo que puede mejorar la hidrofobicidad [15].

Al mezclarse con el asfalto, estos polímeros crean una barrera física y química que evita la penetración del agua en la estructura del pavimento, lo que ayuda a prevenir problemas como el "stripping" o la pérdida de cohesión entre los materiales [16]. Además de ofrecer una mayor impermeabilidad, los polímeros hidrofóbicos también contribuyen

a mejorar la durabilidad general del pavimento, prolongando su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento en comparación con asfaltos convencionales [17].

Los polímeros hidrofóbicos aumentan la resistencia del asfalto al agua al crear una barrera que previene la absorción de humedad. Al ser incorporados en la matriz asfáltica, estos polímeros disminuyen la energía superficial del asfalto, lo que reduce la interacción entre el agua y el material. Este efecto genera un comportamiento repelente al agua, conocido como hidrofobicidad, que disminuye notablemente el riesgo de que el ligante asfáltico se desprenda debido a la humedad [14]. Este mecanismo ha demostrado ser eficaz, especialmente en pavimentos expuestos a condiciones climáticas húmedas, donde el agua puede infiltrarse y causar daños significativos en la estructura del pavimento.

[10] Argumentan que la capacidad hidrófoba se evalúa principalmente mediante análisis ópticos y electrónicos; midiendo el ángulo de contacto del agua y la superficie. La rugosidad de la superficie permite el análisis de la microtopografía de dicha superficie.

3. Revisión de la literatura

Para consolidar el conocimiento actual sobre las propiedades y beneficios de estos aditivos,

así como para identificar brechas en la investigación y áreas potenciales de desarrollo se realiza una revisión de investigaciones recientes relacionadas con el empleo de aditivos poliméricos empleados en la modificación de asfaltos. Esta revisión permite evaluar la eficacia de diferentes tipos de polímeros hidrofóbicos, comparar metodologías de incorporación en las mezclas asfálticas y analizar su impacto en las propiedades mecánicas y de resistencia al agua del pavimento.

Se revisaron artículos publicados en la base de datos Scopus. En la Tabla 1 se resumen los principales resultados de la bibliografía consultada.

Año	Autor	Material	Ac (°)
2023	[18].	ceniza de arroz y ceniza volante, hidróxido de sodio y silicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$)	aumento simultáneamente de $3,2^\circ$ en el agregado sin AR después de 28 días de tiempo de curado a un valor de $93,42^\circ$
2024	[19].	tereftalato de polietileno reciclado (rPET)	Promedio 144° máximo 148°
2024	[20].	metiltrimetoxisilano (MPTMS) y dimetildimetoxisilano (DMDMOS)	*
2022	[21]	caucho superhidrofóbico, nanopartículas de SiO_2 y el relleno (CaCO_3)	150°

*no se refiere en el artículo
Fuente: Elaboración propia

[21] Examina métodos para crear recubrimientos de caucho altamente repelentes al agua, enfocándose en el uso de nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2) como refuerzo y carbonato de calcio (CaCO_3) como relleno. Estas combinaciones generan estructuras superficiales a escala nano y micro que atrapan aire, disminuyendo así la energía de la superficie. El estudio también considera materiales basados en carbono, como los nanotubos. Se propone que las investigaciones futuras se enfoquen en optimizar la resistencia y sostenibilidad de estos recubrimientos de caucho natural.

El análisis también aborda la unión entre el agregado y el asfalto utilizando compuestos de silano. Los experimentos de ebullición en agua y mediciones de ángulo de contacto demostraron que el tratamiento hidrofóbico disminuyó la absorción de agua y aumentó la resistencia al daño por humedad en las mezclas asfálticas. Se determinó que las condiciones óptimas de procesamiento incluyen un medio ácido durante media hora, lo cual mejora la estabilidad del sistema agregado-asfalto.

Se emplearon técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM), la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y simulaciones de dinámica molecular (MD) para explorar el mecanismo de modificación.

Para analizar el impacto de los polímeros hidrofóbicos en los rellenos a base de sal utilizados en hormigones asfálticos anticongelantes (AFAC), [22] evaluaron propiedades como absorción de humedad, liberación de sal y estabilidad térmica. Sin precalentamiento, el punto de ablandamiento no mejoró la conductividad de las sales modificadas, pero alteró la liberación de sal en el concreto asfáltico.

Análisis térmicos y microscopía revelaron que temperaturas de 100-200°C ablandan las partículas hidrofóbicas sobre la sal, descomponiéndose a más de 200°C. Se identificaron cuatro configuraciones de partículas hidrofóbicas en la superficie salina y tres patrones de liberación de sal.

4. Resultados y discusión

Los resultados del estudio destacan el gran potencial de los agregados hidrofóbicos basados en geopolímeros elaborados con ceniza de arroz y ceniza volante; como una alternativa sostenible para la construcción de pavimentos. Estos agregados previenen el desprendimiento del asfalto en condiciones húmedas y permiten una reducción en su consumo, generando ahorros en costos. Se identificó que una proporción óptima de activadores $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 1:1 mejora la resistencia a la compresión y la estructura porosa del agregado, mientras que el recubrimiento con asfalto incrementa su

hidrofobicidad, sugiriendo su idoneidad para pavimentos reciclados. Además, aumentar la cantidad de mullita en la mezcla mejora sus propiedades hidrofóbicas.

Por otro lado, la eficacia del tereftalato de polietileno reciclado (rPET) micronizado mejora notablemente la hidrofobicidad del ligante asfáltico. El tratamiento térmico del asfalto con rPET a 100°C incrementó el ángulo de contacto con el agua (WCA) a un promedio de 144° y un máximo de 148°, lo que sugiere la posibilidad de alcanzar superficies superhidrofóbicas. Este aumento se atribuye a la mayor rugosidad superficial generada por las partículas de rPET incrustadas en el asfalto. Un tiempo de curado más prolongado también mejora la durabilidad de estas propiedades hidrofóbicas.

Asimismo el tratamiento hidrofóbico de agregados con metiltrimetoxisilano (MPTMS) y dimetildimetoxisilano (DMDMOS) mejora la resistencia al daño por agua en mezclas asfálticas. La modificación superficial redujo la absorción de agua y disminuyó la polaridad de los agregados, mejorando su compatibilidad con el asfalto. Los análisis mostraron que las interacciones entre los polímeros y los grupos del agregado forman agrupaciones hidrofóbicas que aumentan la rugosidad superficial y mejoran la estabilidad del sistema agregado-asfalto. Estos hallazgos proporcionan una comprensión detallada del

mecanismo de modificación interfacial y un impacto positivo en la durabilidad de los pavimentos en condiciones húmedas.

5. Conclusiones

Los estudios analizados demuestran avances significativos en la mejora de la hidrofobicidad y durabilidad de los pavimentos asfálticos mediante tres enfoques innovadores:

1. Agregados geopoliméricos hidrofóbicos elaborados a partir de ceniza de arroz y ceniza volante.
2. Modificación con rPET: Este método no solo mejora la durabilidad del pavimento, sino que también propone una solución sostenible para el reciclaje de PET.
3. Tratamiento de agregados con silanos: La modificación superficial de agregados utilizando MPTMS y DMDMOS mejora significativamente la adhesión entre el agregado y el asfalto, aumentando la resistencia al daño por agua.

6. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por el apoyo financiero recibido para llevar a cabo su investigación.

7. Referencias

- [1] M. A. Alvarado Guzmán y A. F. Ayala Tamara, «Seminario de profundización reciclaje pavimentos flexible: Estudio de mezclas asfálticas recicladas modificadas con diferentes porcentajes de WEO (WA)», may 2019, Accedido: 29 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12494/10164>
- [2] A. S. Balaguera, O. D. Leguizamón, y L. L. Valiente, «Gestión de pavimentos basado en Sistemas de Información geográfica (SIG): una revisión», *ing. Solidar*, vol. 14, n.º 26, Art. n.º 26, sep. 2018, doi: 10.16925/in.v14i26.2417.
- [3] «Evaluación de la relación entre la permeabilidad y el daño por humedad en pavimentos de hormigón asfáltico | Revista de materiales en ingeniería civil | Vol 27, N° 5». Accedido: 29 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001129](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001129)
- [4] «Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures», *Construction and Building Materials*, vol. 19, n.º 1, pp. 11-18, feb. 2005, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.003.
- [5] M. Emtiaz, M. N. Imtiyaz, M. Majumder, I. I. Idris, R. Mazumder, y M. M. Rahaman, «A Comprehensive Literature Review on Polymer-Modified Asphalt Binder», *CivilEng*, vol. 4, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2023, doi: 10.3390/civileng4030049.
- [6] L. B. Boinovich y A. M. Emelyanenko, «Hydrophobic materials and coatings: principles of design, properties and applications», *Russ. Chem. Rev.*, vol. 77, n.º 7, p. 583, jul. 2008, doi: 10.1070/RC2008v077n07ABEH003775.
- [7] J. C. M. Ossa y E. A. O. Henao, «Modificación polimérica de asfaltos», 2012.
- [8] «Effect of SBS and crumb rubber on asphalt modification: A review of the properties and practical application», *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 9, n.º 5, pp. 836-863, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jtte.2022.03.002.
- [9] «Recent development of ethylene-vinyl acetate modified asphalt», *Construction and Building Materials*, vol. 363, p. 129800, ene. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129800.
- [10] I. R. Segundo, S. Landi, E. Freitas, V. C. Branco, M. F. M. Costa, y J. Carneiro, «Superhydrophobic Asphalt Pavements: Surface Improvement», *EPJ Web Conf.*, vol. 238, p. 12012, 2020, doi: 10.1051/epjconf/202023812012.
- [11] «MATERIALES AUTOLIMPIANTES en JSTOR». Accedido: 30 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/26000766>
- [12] C. Yeverino, «Síntesis de materiales súper-hidrófobos mediante la funcionalización de nanopartículas de sílica en hule silicón empleando polimerización aniónica viviente», 2013.
- [13] R. Wezel «Ind, Eng Chem» 28 988, 1936.
- [14] «Transp Res Rec J. Transp Res Rec J TranArabzadeh, A., Ceylan, H., Kim, S., Gopalakrishnan, K., & Sassani, A.sp Res Board», pp. 10-17, 2016.
- [15] Nascimento, J., Pereira, P., Freitas, E., & Fernandes, F., «7th Int. Conf. Maint. Rehabil. Pavements Technol. Control, . At Auckland, New Zealand». 2012.
- [16] López, P., & Gutiérrez, H. (2021), «Polímeros hidrofóbicos en asfaltos modificados: Una revisión crítica.», *Journal of Civil Engineering*, vol. 15(1), n.º 101-112., 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcivileng.2021.101>.
- [17] Smith, A., Zhao, J., & Wang, L., «Performance improvement of asphalt pavements using hydrophobic polymers: Field and laboratory evaluations», 20(5), pp. 1152-1168., 2019.

- [18] C. Ago, G. Li, J. Wu, y N. I. Md Yusoff, «Feasibility Study of Using Hydrophobic Geopolymer-Based as Aggregate Substitution in Asphalt Mixture», *Polymers*, vol. 15, n.º 14, Art. n.º 14, ene. 2023, doi: 10.3390/polym15143077.
- [19] «Improving hydrophobicity of asphalt surfaces using pulverized recycled polyethylene terephthalate: Towards efficient roofing/waterproofing», *Materials Today Communications*, vol. 39, p. 109166, jun. 2024, doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.109166.
- [20] «Study on the influence mechanism of hydrophobic materials-MPTMS and DMDMOS on the water resistance performance of asphalt mixtures - ScienceDirect». Accedido: 30 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061824011978>
- [21] «Recent progress in superhydrophobic rubber coatings», *Progress in Organic Coatings*, vol. 171, p. 107024, oct. 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.107024.
- [22] «Effects of the softening point of hydrophobic polymers on the salt-based filler used in antifreeze asphalt concretes», *Materials & Design*, vol. 204, p. 109663, jun. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.109663.

Detección de corrosión en rodamientos de motores de inducción usando aprendizaje automático y fusión de datos

Detection of corrosion damage in induction motors bearing using machine learning algorithms and data fusion

Pacheco-Guerrero, J Pablo^{1*}, Zamudio-Ramírez, Israel¹, Osornio-Rios, Roque Alfredo¹, Antonino Daviu, Jose².

¹Maestría en Ciencias (Mecatrónica), DIPFI, UAQ, Facultad de Ingeniería, San Juan del Río, Querétaro, México

²Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, Valencia, España

jpacheco10@alumnos.uaq.mx

Palabras clave: MEC, Motores de Inducción, Corrosión, Algoritmo del Árbol de decisión, Indicadores no Estadísticos, Ensamblaje de Modelos de Aprendizaje.

Resumen- La detección de fallas en motores de inducción es crucial para prevenir problemas graves y paradas de producción, ya que estos motores son ampliamente utilizados y consumen una cantidad significativa de la energía eléctrica mundial. Los rodamientos representan más del 40% de las fallas en estos motores. Aunque los métodos de aprendizaje automático e inteligencia artificial son comunes, se proponen enfoques más efectivos que combinan múltiples modelos para mejorar la clasificación del nivel de daño. Este trabajo se centra en la obtención de señales de flujo magnético y corriente en motores de inducción bajo diferentes gradualidades de corrosión. Se utilizará el Análisis Discriminante Lineal (LDA del inglés *Linear Discriminant Analysis*) para la reducción de dimensionalidad y el Algoritmo de Árboles de Decisión con el algoritmo de aprendizaje por conjuntos Bagging para mejorar la precisión. Además, se aplicará un análisis dinámico de las señales mediante el uso de parámetros no estadísticos.

Keywords: MEC, Induction Motors, Corrosion, Decision Tree Algorithm, Non-Statistical Indicators, Assembling Learning Models.

Abstract- The detection of faults in induction motors is crucial to prevent serious problems and production stoppages, as these motors are widely used and consume a significant amount of energy. Bearings account for more than 40% of faults in these motors. Although machine learning and artificial intelligence methods are common, more effective approaches combining multiple models are proposed to improve damage level classification. This work focuses on obtaining magnetic flux and current signals in induction motors under different corrosion gradations. Linear Discriminant Analysis (LDA) will be used for dimensionality reduction, Decision Trees Algorithm with Bagging ensemble algorithm to improve accuracy. In addition, a dynamic analysis of the signals will be applied by using non-statistical parameters.

1. Introducción

Los motores de inducción son esenciales en la industria por su confiabilidad, bajo costo y versatilidad. No obstante, enfrentan fallos en componentes, especialmente corrosión, lo que

reduce su eficiencia y genera pérdidas económicas por paros no planificados. Se estima que el 42% de la energía mundial se destina a la industria, y dos tercios de esta son usados por motores eléctricos, representando el 28% de la energía mundial [1]. Además, estudios indican que los motores de inducción

son los más utilizados globalmente [2]. Por ello, junto a factores como largos periodos de mantenimiento, estos motores pueden fallar, generando pérdidas económicas. Los fallos, clasificados en mecánicos y eléctricos, se distribuyen así: 40% en rodamientos, 36% en estator, 10% en rotor y 14% en otros [3]. Al ser los rodamientos los de mayor incidencia, es fundamental realizar detección temprana para planificar mantenimientos, evitando así altos consumos de energía y disminución de eficiencia. En entornos industriales, condiciones de alta temperatura y humedad, junto con mala lubricación o sellos deficientes, provocan corrosión en rodamientos por ingreso de agua [4].

Aunque métodos convencionales como el análisis de la firma de corriente y la transformada rápida de Fourier han sido utilizados, las técnicas avanzadas basadas en aprendizaje automático y fusión de datos han demostrado mayor precisión. Sin embargo, la literatura existente aún carece de enfoques de ensamblaje de modelos de aprendizaje para mejorar la clasificación de los daños por corrosión en los rodamientos. Este trabajo propone un enfoque innovador basado en la fusión de señales de flujo magnético y corriente, junto con el ensamblaje de modelos de aprendizaje automático, para mejorar la detección de daño por corrosión en rodamientos de motores de inducción. Se destacan los algoritmos de aprendizaje automático e inteligencia artificial como métodos que permiten resultados más precisos [5]. Los trabajos desarrollados se centran en un solo algoritmo para clasificar fallos. Por ejemplo, en [6] lograron detectar fallos ante diversas condiciones de desbalance y desgaste utilizando la Máquina de Soporte Vectorial y la transformada de Hilbert-Huang, logrando un 78.96% de precisión promedio. En [7] se utilizó la fusión de sensores de vibraciones y celda de carga con un algoritmo basado en K vecino más cercano para discriminar entre

rodamientos sanos y con fallo de erosión por chispa, sin reportar la exactitud. Algunos autores utilizan múltiples clasificadores para seleccionar el que genera mayor precisión. Por ejemplo, en [8] utilizaron diversos clasificadores de aprendizaje para discriminar entre rodamientos sanos y con fallo en pista interior y exterior, donde la máquina de soporte vectorial obtuvo resultados más precisos, logrando una exactitud de entre el 81 y 96%. Algunos trabajos como en [9] y [10] lograron discriminar los rodamientos sanos ante fallos en pista exterior usando diversos clasificadores y obteniendo precisiones menores al 96.9%.

La literatura muestra que la corrosión se analiza mediante técnicas en frecuencia o tiempo-frecuencia; sin embargo, no siempre resultan efectivas, pues puede presentarse en distintas zonas del rodamiento, generando espectros no uniformes. En [11] se utilizó una combinación de transformada Wavelet, análisis discriminativo y redes neuronales para clasificar la severidad de fallos en rodamientos, con precisiones entre el 88 y 98%. En [12], se aplicó la modulación biespectro en turbinas eólicas para detectar corrosión a partir de componentes espectrales, logrando alta precisión. En [13] se realizó un análisis de corriente y flujo parásito en motores de inducción, discriminando fallos por corrosión frente a otros tipos. En [14] se detectó corrosión en rodamientos mediante análisis de vibraciones y transformadas Wavelet, logrando alta precisión en la clasificación, sin especificar porcentaje. Finalmente, en [15] se propuso una metodología para detectar fallos por corrosión en motores síncronos de reluctancia usando parámetros tiempo-frecuencia, obteniendo precisiones por encima del 90%.

En este artículo, se propone una metodología para la detección de corrosión en los rodamientos de motores de inducción, basada en el ensamblaje de modelos de aprendizaje

automático. La metodología integra señales de flujo magnético y corriente, aplicando Análisis Discriminante Lineal (LDA del inglés *Linear Discriminant Analysis*). Además del Algoritmo de Árbol de decisión y Bagging (del inglés *Bootstrap aggregating*) para mejorar la precisión en la identificación de los niveles de daño. Los resultados muestran que este enfoque no solo es efectivo, sino que ofrece mejoras significativas en la clasificación de daños en comparación con métodos tradicionales.

2. Metodología y desarrollo matemático

2.1 Diagrama metodológico

En esta sección se presenta la metodología desarrollada para lograr los objetivos del presente trabajo. Se divide en dos partes esenciales: el banco de pruebas y el diagrama metodológico como se muestra en la Figura 1. El banco de pruebas se compone de un variador de frecuencia que se utiliza para conseguir un arranque controlado para una correcta operación del motor. Dicha máquina eléctrica cuenta con dos sensores principales que se integran en el sistema de adquisición de señales: un sensor de flujo magnético de dispersión y una pinza amperimétrica para la adquisición de la señal de corriente. Las señales obtenidas por estos sensores serán capturadas por un sistema de adquisición de señales propietario, el cual genera las entradas para el siguiente bloque de la metodología: el procesamiento y análisis de las señales.

2.2 Procesamiento de señales

Las señales adquiridas (tanto de corriente como de flujo magnético de dispersión) son procesadas en una computadora utilizando la herramienta llamada PyCharm, el cual es un entorno de desarrollo integrado de Python utilizado para la ciencia de datos. El procesamiento incluye la obtención de dos indicadores no estadísticos como lo es la

energía de Teager-Kaiser y la entropía de muestreo. La energía de Teager-Kaiser según [16] se define como una medida de energía asociada a procesos mecánicos que generan una señal. Este método permite calcular el comportamiento energético de una señal oscilante en función de su frecuencia. La forma de obtener la energía de Teager-Kaiser se muestra en la ecuación (1). Donde X representa la señal (que puede ser de corriente o flujo magnético de dispersión) y n su correspondiente valor de muestra.

$$E_n = X_n^2 - X_{n+1} * X_{n-1} \quad (1)$$

Por su parte, la entropía de muestreo se puede definir según [17] como una técnica usada para medir la aleatoriedad o complejidad en una serie de datos, sin necesidad de conocer previamente la fuente que los generó. La entropía de muestreo se define como el logaritmo negativo de la probabilidad condicional de que dos secuencias similares de longitud m permanezcan siendo similares cuando se les agrega un punto adicional, formando así la secuencia $m+1$. La principal diferencia con la entropía aproximada es que con la entropía de muestreo se evita el auto conteo, es decir, la comparación de una secuencia consigo misma, lo que permite reducir el sesgo que podría generar la regularidad de los datos. La entropía de muestreo se calcula como muestra la ecuación (2), donde A es la probabilidad de que dos secuencias similares de longitud m sigan siendo similares cuando se extiende a $m+1$, B es la probabilidad de que dos secuencias sean similares en longitud m .

$$E_m(m, r, N) = -\log \left[\frac{A^m(r)}{B^m(r)} \right] \quad (2)$$

2.3 Análisis de varianza

En este punto, se plantea realizar un análisis de varianza ANOVA (por sus siglas en inglés *Analysis of Variance*) de las señales de corriente y flujo magnético de dispersión para el estado sano, corrosión nivel 1 y corrosión

nivel 2 para conocer la cantidad de variación dentro de cada muestra en comparación con la cantidad de variación entre muestras.

2.4 Uso de LDA

La integración de datos de corriente y flujo magnético, junto con los estadísticos de energía de Teager-Kaiser y entropía, produce una dimensionalidad de 4. Con 38,000 datos y ventanas de tamaño 500, aplicando un 20% de solapamiento, se obtienen 94 ventanas por clase. Para mejorar la separación entre clases, se aplica Análisis Discriminante Lineal (LDA), una técnica supervisada de reducción de dimensionalidad que maximiza la varianza entre clases y minimiza la varianza dentro de ellas [18]. Se preparan matrices de características, calculando medias y construyendo matrices de dispersión, de las cuales se extraen y seleccionan vectores y valores propios para la transformación. Al proyectar los datos en dos dimensiones, se facilita la visualización y permite una mejor interpretación de la separación entre clases.

2.5 Uso de Árbol de Decisión

A continuación, con los datos reducidos en dimensión, deben ser los datos de entrada para el Algoritmo de Árbol de Decisión. Según [19], el método es una herramienta muy utilizada en la toma de decisiones, representando gráficamente las decisiones y sus posibles resultados en forma de un grafo con ramas y hojas. Este enfoque es de gran ayuda debido a que presenta una solución lógica entre diversas opciones disponibles. El árbol de decisión consiste en una serie de nodos (estos representan decisiones o pruebas) y ramas (representan los resultados de las decisiones)

2.6 Uso de Bagging

Finalmente, el método de ensamblaje de modelos de aprendizaje Bagging, se emplea para mejorar la precisión del modelo. Dicho

método combina múltiples modelos de clasificación independientes (del Algoritmo de Árboles de Decisión) los cuales son entrenados sobre diferentes subconjuntos de los datos, generados mediante muestreo con reemplazo y se genera una predicción final, obteniendo un resultado más estable y preciso.

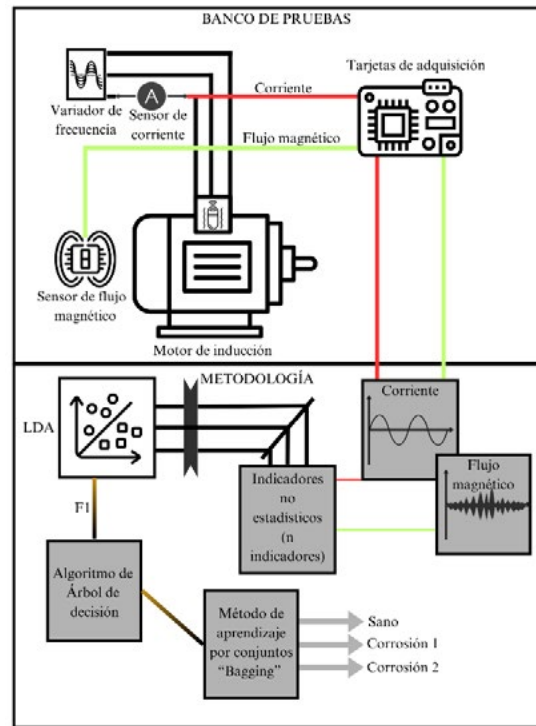


Figura 1. Diagrama metodológico seguido.

La matriz de pruebas a realizar consta de tres condiciones para el rodamiento, sano, corrosión con gradualidad 1 y corrosión con gradualidad 2. Las gradualidades de corrosión en el rodamiento se introdujeron mediante el uso de una solución salina por diferentes cantidades de tiempo. La frecuencia de operación del motor fue la nominal de 60 Hz y se realizaron 10 pruebas para cada estado del rodamiento.

Finalmente, los datos específicos para el desarrollo del presente trabajo se describen a continuación. Los rodamientos utilizados son los 6203 2RS/C3, son de tipo metálicos y es uno de los rodamientos más comunes en la industria, entre sus principales características

se tienen los 40 mm de diámetro exterior, 17 mm de diámetro interior y 8 bolas, además de sellos de hule. La Figura 2 muestra los rodamientos y sus gradualidades en el siguiente orden: rodamiento sano, rodamiento con corrosión nivel 1, rodamiento con corrosión nivel 2.



Figura 2. Gradualidades de fallo en rodamientos metálicos tipo 6203 2RS/C3.

La Figura 3 muestra el sistema mecánico, el cual consta de un motor trifásico WEG de 1 caballo de fuerza y con alimentación a 220 V, el cual se alimenta a un variador de velocidad modelo CFW08 WEG. Se muestra de igual manera un alternador convencional, el cual se une al motor mediante una banda de hule y un sistema de poleas que representan una carga aproximada para el motor del 30%. Todos los dispositivos anteriores se muestran en un cuadro color naranja. Por su parte, tanto la pinza amperimétrica como el sensor de flujo magnético de dispersión se muestran encerrados en color verde. Por último, en amarillo se encierran las tarjetas de adquisición de datos propietarias.

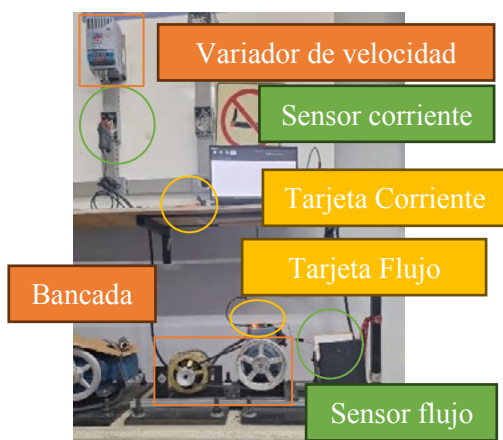


Figura 3. Banco de pruebas instalado.

Las señales tienen como características que se hace una lectura de 48 segundos, donde 10 segundos corresponden al estado transitorio y 38 segundos corresponden al estado estable, mismos que serán la base para analizar mediante la metodología propuesta. Además, las tarjetas de adquisición propietarias son capturadas con una frecuencia de muestreo de 1 kHz. Los sensores utilizados son un magnetómetro de tres ejes modelo BM1422AGMV, y una pinza amperimétrica marca fluke i200s.

Ahora bien, se analizan los 38 segundos de las señales en estado estable, con ventanas de 0.5 segundos y con un ventaneo del 20% de solapamiento. Finalmente, los hiperparámetros para programar el Algoritmo de Árbol de decisión: criterio 'gini' para mediar la calidad de una división, la profundidad máxima del árbol en 5, el número mínimo de muestras requeridas para dividir un nodo en 2, el número mínimo de muestras en una hoja en 1 y el número máximo de características a considerar para una mejor división como automático. Para el Bagging se tiene como hiperparámetros el modelo base, que es Árbol de Decisión, el número de estimadores o árboles a entrenar en 10, la proporción de muestras a utilizar para entrenar cada estimador en 1, la proporción de características a utilizar para cada estimador en 1 y el Bootstrap en verdadero, lo que indica que se utilizaran muestras al entrenar los estimadores. Los hiperparámetros seleccionados tanto para el modelo de Árbol de Decisión como para el método de Bagging fueron establecidos siguiendo las recomendaciones y prácticas sugeridas en [20], donde se detalla la configuración de estos parámetros para optimizar el rendimiento y la estabilidad del modelo en la biblioteca de Scikit-learn. Por último, se procede a realizar validación cruzada por medio del método de 5-fold.

3. Resultados y discusión

La Figura 4 presenta el resultado del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la señal de corriente utilizando el no estadístico de Teager-Kaiser. En la gráfica de cajas y bigotes, se puede observar que existen valores atípicos que se alejan considerablemente de los datos centrales, indicando variabilidad en las mediciones. Además, esta visualización revela que las clases de rodamiento sano y los distintos niveles de corrosión no se separan de manera efectiva, lo que sugiere que, por sí sola, la señal de corriente no es suficiente para distinguir claramente entre las diferentes condiciones de rodamiento.

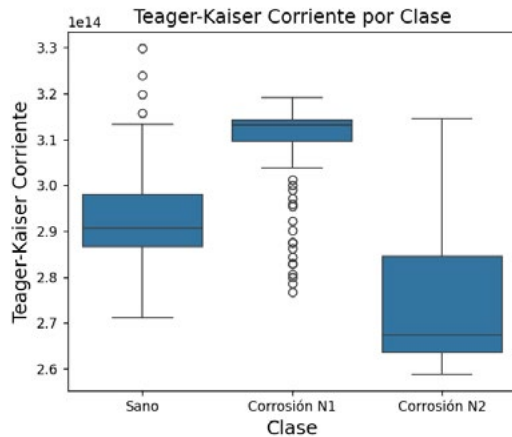


Figura 4. Análisis de varianza para la señal de corriente con el parámetro de energía de Teager-Kaiser.

La Figura 5 muestra la entropía de muestreo para la señal de corriente, donde también destaca la falta de separación entre las clases. La entropía indica cuán dispersos están los datos y, en este caso, refleja que las clases de rodamiento sano, corrosión nivel 1 y corrosión nivel 2 presentan una superposición significativa. Este resultado resalta la necesidad de aplicar técnicas más sofisticadas, como el análisis discriminante lineal (LDA), para mejorar la clasificación de estas condiciones.

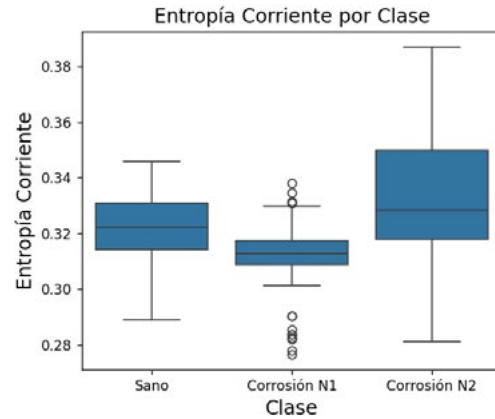


Figura 5. Análisis de varianza para la señal de corriente con el parámetro de entropía de muestreo.

La Figura 6 ilustra los resultados obtenidos al aplicar LDA, donde se observa un notable incremento en la separación de las clases en comparación con los análisis previos. A pesar de esta mejora, sigue habiendo ciertos datos que se traslapan, lo que indica que aún hay desafíos en la clasificación precisa de las distintas condiciones de rodamiento. Este resultado subraya la importancia de utilizar métodos avanzados de clasificación para maximizar la precisión en la identificación de la condición del rodamiento.

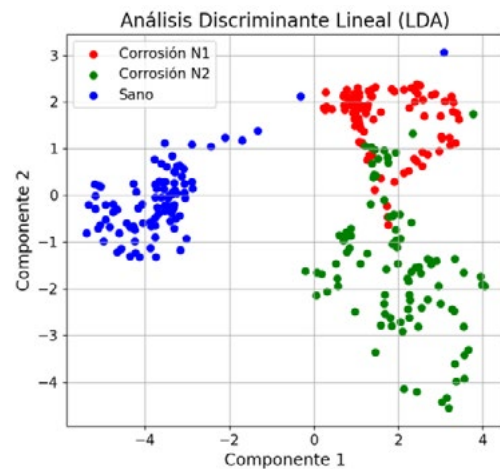


Figura 6. Análisis Discriminante Lineal proyectado en dos dimensiones.

Finalmente, la Figura 7 presenta la matriz de confusión resultante del modelo de Bagging, que alcanza una precisión del 99%. Este resultado es significativo, ya que demuestra

que el modelo es altamente efectivo en la clasificación de las condiciones del rodamiento. Se observa que solo un dato del rodamiento sano fue erróneamente clasificado como corrosión nivel 1, lo que subraya la eficacia del enfoque de Bagging para manejar las variabilidades y las superposiciones en los datos, logrando así un rendimiento sobresaliente en la identificación de las condiciones del rodamiento. Cabe resaltar que, de la muestra de 94 indicadores estadísticos de las múltiples ventanas, se usa el método de validación cruzada con 5-fold, por lo que 1/5 de los datos se usa para validación y 4/5 para el entrenamiento.

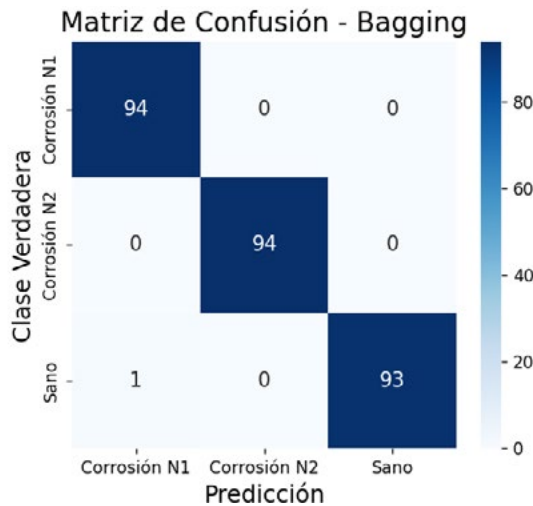


Figura 7. Matriz de confusión resultante del modelo Bagging entrenado con Algoritmo de Árbol de Decisión.

Dentro de la literatura revisada, se observa que los trabajos existentes reportan porcentajes de precisión que oscilan entre el 78.96% y el 96.9%, utilizando diversas técnicas de análisis y algoritmos de aprendizaje automático en la detección de corrosión en rodamientos de motores de inducción y otros fallos. En comparación, la presente metodología, que integra señales de flujo magnético y corriente junto con el ensamblaje de modelos de aprendizaje, ha demostrado ser más precisa, llegando al 99%. Estos resultados resaltan la importancia de continuar explorando enfoques

innovadores que mejoren la precisión en el diagnóstico de fallos en la industria.

4. Conclusiones

En este trabajo, se logró una efectiva separación de los datos de rodamiento en tres categorías: rodamiento sano, corrosión 1 y corrosión 2. A través de un análisis estadístico inicial, se observó que los parámetros utilizados de manera aislada no eran suficientes para diferenciar claramente entre las clases. Esto subraya la importancia del uso de técnicas de análisis más avanzadas, como el Análisis Discriminante Lineal (LDA), que, aunque no alcanzó una precisión muy alta, proporcionó una base sólida para la clasificación.

Al implementar un clasificador de Algoritmo de Árbol de Decisión junto con la técnica de Bagging, se logró una notable mejora en la precisión del modelo, alcanzando un 99%, resultando en un incremento en la precisión en comparación con las metodologías revisadas. Este resultado resalta la eficacia de combinar métodos de clasificación para optimizar el rendimiento en problemas complejos de separación de clases. La investigación demuestra que, aunque las técnicas estadísticas básicas son útiles, la aplicación de modelos de aprendizaje automático puede proporcionar soluciones más robustas y precisas en la identificación de condiciones de rodamiento.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (CVU 1316019), que ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo. Su apoyo ha sido invaluable, permitiendo la plena dedicación en esta investigación, además de poder adquirir los conocimientos necesarios para llevar a cabo este proyecto. A los asesores y colegas por su orientación, apoyo y colaboración durante este proceso.

Referencias

- [1] Szabó, L. A survey on the efficiency improves of electrical machines. In *2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*, 2019, (pp. 1-6). IEEE.
- [2] De Souza, D. F., Salotti, A. M., Sauer, I. L., Tatizawa, H., de Almeida, A. T., & Kanashiro, A. G. A Performance Evaluation of Three-Phase Induction Electric Motors between 1945 and 2020. *Energies* 2022, 15, 2002. *Performance of Induction Machines*, 5.
- [3] Garcia-Calva, T.; Morinigo-Sotelo, D.; Fernandez-Cavero, V.; Romero-Troncoso, R. Early Detection of Faults in Induction Motors. A Review. *Energies* 2022, 15, 7855. <https://doi.org/10.3390/en15217855>.
- [4] SKF, "Falla de rodamientos y cómo prevenirla", SKF.com, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.skf.com/mx/products/rolling-bearings/bearing-failure-and-how-to-prevent-it>. [Consultado: 15 de abril de 2024].
- [5] Yadav, E., & Chawla, V. K. An explicit literature review on bearing materials and their defect detection techniques. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2022, 1637-1643.
- [6] F. G. M. Herrera, M. B. E. Mortera and C. F. Ostia, "Application of Support Vector Machine Algorithm in Real-time Bearing Fault Diagnostic Model for Single-phase Induction Motor using Hilbert-Huang Transform as Feature Extractor," *2023 7th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, Medan, Indonesia, 2023, pp. 206-211, doi: 10.1109/ELTICOM61905.2023.10443145.
- [7] Safizadeh, M. S., & Latifi, S. K. Using multi-sensor data fusion for vibration fault diagnosis of rolling element bearings by accelerometer and load cell. *Information fusion*, 18, 2014, 1-8.
- [8] Aldeoes, Y. N., Ghockle, P., & Sondkar, S. Y. Comparison of Machine Learning Algorithms for Bearing Failures Classification and Prediction. In *International Conference on Advances in Electrical and Computer Technologies*, 2021, (pp. 269-282). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [9] Nakamura, H.; Mizuno, Y. Diagnosis for Slight Bearing Fault in Induction Motor Based on Combination of Selective Features and Machine Learning. *Energies* 2022, 15, 453. doi:10.3390/en15020453
- [10] Esakimuthu Pandarakone, S.; Mizuno, Y.; Nakamura, H. A Comparative Study between Machine Learning Algorithm and Artificial Intelligence Neural Network in Detecting Minor Bearing Fault of Induction Motors. *Energies* 2019, 12, 2105. <https://doi.org/10.3390/en12112105>.
- [11] Sharma, S., Abed, W., Sutton, R., & Subudhi, B. Corrosion fault diagnosis of rolling element bearing under constant and variable load and speed conditions. *IFAC-PapersOnLine*, 48(30), 2015, 49-54.
- [12] Chen, X., Xu, W., Liu, Y., & Islam, M. R. Bearing corrosion failure diagnosis of doubly fed induction generator in wind turbines based on stator current analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(5), 2019, 3419-3430.
- [13] Zamudio-Ramírez, I., Biot-Monterde, V., Navarro-Navarro, A., Antonino-Daviu, J., Osornio-Rios, R. A., Mäki-Ontto, P., ... & Fajt, T. Detection of corrosion in ball bearings through the computation of statistical indicators of stray-flux signals. In *IECON 2022-48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2022, (pp. 1-6). IEEE.
- [14] Sathujoda, P. A novel corrosion detection method using wavelet transformed mode shapes of a functionally graded rotor-bearing system. *Composites Part C: Open Access*, 5, 2021, 100134.
- [15] Navarro-Navarro, A., Biot-Monterde, V., Ruiz-Sarrió, J. E., Antonino-Daviu, J., Osornio-Rios, R. A., & Zamudio-Ramírez, I. Detection of Corrosion in Ball Bearings in Synchronous Reluctance Motors through the Computation of Statistical Indicators of Current Signals. In *2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2023, (pp. 530-534). IEEE.
- [16] J. F. Kaiser, "On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal," *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Albuquerque, NM, USA, 1990, pp. 381-384 vol.1.
- [17] Delgado-Bonal, A.; Marshak, A. Approximate Entropy and Sample Entropy: A Comprehensive Tutorial. *Entropy* 2019, 21, 541.
- [18] Balakrishnama, S., & Ganapathiraju, A. (1998). Linear discriminant analysis-a brief tutorial. Institute for Signal and information Processing, 18(1998), 1-8.
- [19] A. Navada, A. N. Ansari, S. Patil and B. A. Sonkamble, "Overview of use of decision tree algorithms in machine learning," *2011 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*, Shah Alam, Malaysia, 2011, pp. 37-42, doi: 10.1109/ICSGRC.2011.5991826.
- [20] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, É. Scikit-learn: Machine learning in Python. *The Journal of Machine Learning research*, 2011, 12, 2825-2830.

Técnicas didácticas y sus objetivos pedagógicos para la enseñanza-aprendizaje de la arquitectura

Didactic techniques and their pedagogical objectives for the teaching- learning of architecture

Barragán Vargas Paola, Flores Gutiérrez Avatar, López Domínguez Guillermo Iván

Maestría en Arquitectura, Facultad de ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

pao.barragan02@gmail.com avatar.flores@gmail.com guillermo.lopez@uaq.edu.mx

Palabras clave: ARQ , Enseñanza de arquitectura, taller de proyectos, pedagogía en arquitectura, Latinoamérica.

Resumen- El proceso de enseñanza-aprendizaje de la arquitectura se ha convertido en un tema recurrente dentro de la discusión sobre los límites y reconfiguraciones de la disciplina frente a un contexto que exige una constante adaptación a nuevos retos. Sin embargo, aún se desconocen en profundidad cuales son las técnicas didácticas empleadas dentro de los talleres de proyecto arquitectónico y cuáles son sus objetivos pedagógicos. Comprender cuáles son estas técnicas y sus objetivos, así como dónde se están analizando, contribuye al entendimiento y a la teorización de la enseñanza-aprendizaje de la arquitectura. A través de una revisión bibliográfica, este artículo tiene como objetivo identificar las técnicas didácticas utilizadas en los talleres de proyecto arquitectónico que se analizan con mayor frecuencia y con qué objetivo pedagógico se proponen estas. Con la revisión planteada, se concluye que las técnicas más estudiadas están orientadas a la práctica profesional, respondiendo a las competencias laborales. Estas conclusiones aportan a una base para futuros estudios sobre didáctica y pedagogía aplicados a la formación en arquitectura.

Keywords: ARQ , Architecture teaching, design studio, pedagogy in architecture, Latin America.

Abstract- The teaching-learning process of architecture has become a recurring theme within the discussion about the limits and reconfigurations of the discipline in a context that demands constant adaptation to new challenges. However, the didactic techniques used within the architectural design workshops and their pedagogical objectives are still unknown. Understanding what these techniques are and their objectives, as well as where they are being analyzed, contributes to the understanding and theorization of the teaching-learning of architecture. Through a bibliographic review, this article aims to identify the didactic techniques used in the architectural design workshops that are most frequently analyzed and with what pedagogical objective these are proposed. With the proposed review, it is concluded that the most studied techniques are oriented to professional practice, responding to work competencies. These conclusions provide a basis for future studies on didactics and pedagogy applied to architecture training.

1. Introducción

El presente artículo tiene como objetivo realizar una revisión bibliográfica sobre cuales

técnicas didácticas y con qué objetivos pedagógicos se plantean dentro de los talleres de proyecto de diseño.

La figura del taller de proyectos ha sido adoptada como la estrategia habitual para

enseñar a diseñar en las escuelas de arquitectura. La forma en que se enseña el diseño arquitectónico ha sido imitando los métodos, técnicas, inspiraciones, aspiraciones y criterios de cada docente, generando un modelo similar a la enseñanza de las artes, donde existe un maestro y un aprendiz y la forma de aprender consiste en replicar la manera en que el maestro hace las cosas [1].

Este modelo pedagógico genera confusiones en el entendimiento de las y los estudiantes al ser notoria la ausencia de un objetivo común en la arquitectura, ya que la prioridad está en los criterios de evaluación de cada docente en términos de sus propios métodos dentro del proceso [2].

Enseñanza de la arquitectura similar a las artes

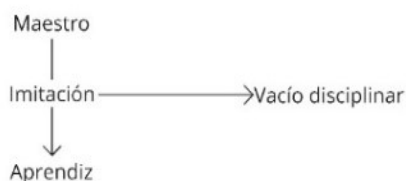


Fig. 1 - Diagrama de la técnica actual de enseñanza-aprendizaje en los talleres de diseño. Elaboración propia basada en [2].

Existe también el marcado mito del “genio”, que se refuerza con la parcialización existente del concepto de arquitectura y a la consideración de esta como un oficio que debe aprenderse a través del adiestramiento empírico, con ejercicios de prueba y error que solo contribuyen a la desilusión de las y los estudiantes al no encontrar el “chispazo” en los primeros intentos para diseñar [3].

En [4] se advierte que la pedagogía de la arquitectura está obsoleta dado que las estructuras curriculares han permanecido prácticamente inalteradas, a pesar de los profundos cambios sociales y tecnológicos

experimentados por la humanidad. Para actualizar o proponer mejoras en la enseñanza en los talleres de proyectos, es necesaria la adopción de nuevas técnicas didácticas que promuevan una definición integral del proyecto arquitectónico [2]. A la par de estas innovaciones técnicas, se hace necesario revisar los enfoques con que se abordan las prácticas arquitectónicas y la formación de las y los futuros arquitectos.

El presente artículo se plantea desde un marco epistémico decolonial, para el cuál, las epistemologías del sur de Santos [5] constituyen una forma de rebeldía frente al establecido universalismo europeo y la idea de que solo existe un conocimiento válido, producido en el norte global [5].

Bajo este contexto, la presente investigación se enfoca en los saberes Latinoamericanos con el propósito de analizar las técnicas didácticas y objetivos pedagógicos utilizados en la región. Dentro de la revisión planteada se busca también identificar si existe una intención interdisciplinar en la aplicación de las técnicas y si se especifica el momento del avance curricular para la propuesta de estas.

Este análisis pretende abrir un debate sobre los propósitos actuales de la enseñanza de la arquitectura, impactando a futuro en el ambiente construido mismo.

2. Metodología

El desarrollo metodológico del presente estudio se diseñó con la intención de lograr el objetivo planteado a través de una revisión bibliográfica de artículos disponibles en Google Académico en español publicados entre 2014 y 2024. Como términos de búsqueda se utilizaron:

- “técnica didáctica” “arquitectura” “taller de proyectos”
- “herramienta didáctica” “arquitectura” “taller de proyectos”

- “objetivo pedagógico” “arquitectura” “taller de proyectos”

Las etapas de la metodología fueron las siguientes:

a. Búsqueda en Google Académico. Realizar la búsqueda de las palabras clave relacionadas al tema y objetivos del artículo.

b. Primer filtro. Se ejecutó un primer descarte de los documentos que:

- Tienen fecha de antigüedad mayor a 10 años desde su publicación.
- No se desarrolla en un país perteneciente a Latinoamérica.
- Son tesis de grado (cualquier grado).
- Son entradas duplicadas.
- No es un artículo de investigación.

c. Segundo filtro. Al analizarse los artículos resultantes del primer filtro se realizó un segundo descarte resultado del análisis de información que tuvo como parámetros:

- La disciplina o materia no corresponde con la arquitectura y/o taller de proyectos.
- El contenido no analiza una técnica didáctica específica.

d. Selección final de artículos. Los artículos resultantes se clasificaron en una tabla que incluye los siguientes datos:

- Código de búsqueda: TD para Técnica didáctica, HD para Herramienta didáctica, OP para Objetivos pedagógicos.
- Nombre del artículo.
- Año de publicación.
- País donde se desarrolló.
- Técnica didáctica analizada.
- Objetivo pedagógico.
- Intersección con otras disciplinas y/o materias.

viii. Nombre de la materia de aplicación.

e. Síntesis de la información.

Analizando la tabla final de selección se logró la síntesis de la información para detectar patrones, coincidencias y/o tendencias según los parámetros planteados en esta revisión.

3. Resultados y discusión

a. Búsqueda en Google Académico. Se ejecutó la búsqueda de las palabras clave durante el período del 11-29 de septiembre de 2024:

- “técnica didáctica” “arquitectura” “taller de proyectos”
- “herramienta didáctica” “arquitectura” “taller de proyectos”
- “objetivo pedagógico” “arquitectura” “taller de proyectos”

b. Primer filtro. Después de realizar la búsqueda de las palabras clave antes señaladas y haciendo el descarte preliminar se obtuvieron un total de 11 artículos (Tabla 1).

Tabla 1. Artículos seleccionados resultado del primer filtro de descarte. Elaboración propia

Palabras clave	Número de artículos preliminar
“técnica didáctica” “arquitectura” “taller de proyectos”	3
“herramienta didáctica” “arquitectura” “taller de proyectos”	4
“objetivo pedagógico” “arquitectura” “taller de proyectos”	4

Dentro de los criterios de exclusión se identificaron los siguientes datos (Tabla 2):

Tabla 2. Artículos descartados en primer filtro. Elaboración propia.

Mayor a 10 años de antigüedad	41
No se desarrolla en un país perteneciente a Latinoamérica	18

Tesis de grado	13
Duplicados	17
No es un artículo de investigación	4

- c. **Segundo filtro.** Después de un análisis específico de contenido en los artículos preliminares, se realizó un segundo descarte con los criterios antes especificados obteniendo un total de 7 artículos (Tabla 3).

Tabla 3. Artículos seleccionados resultado del segundo filtro de descarte. Elaboración propia

Palabras clave	Número de artículos seleccionados
“técnica didáctica” “arquitectura” “taller de proyectos”	2
“herramienta didáctica” “arquitectura” “taller de proyectos”	3
“objetivo pedagógico” “arquitectura” “taller de proyectos”	2

A continuación se hace una breve descripción de los artículos seleccionados en el primer filtro pero posteriormente descartados y los motivos por los cuáles no se consideran aptos:

- 01 **Título:** Desarrollos y experiencias a partir de la práctica pedagógica en las facultades de educación de la zona centro del Colombia: Estado actual de la investigación. [6]

Motivo de descarte: El contenido no es sobre arquitectura.

- 02 **Título:** Los grandes retos en la formación de profesionales y las

nuevas tendencias de la Arquitectura. [7]

Motivo de descarte: Habla sobre el desarrollo general de la currícula de un taller de proyectos más que de una técnica en sí.

- 03 **Título:** ¿Cómo integrar herramientas y habilidades tecnológicas y digitales, en los procesos sensibles y proyectuales que exige el taller de proyectos de arquitectura? [8]

Motivo de descarte: No habla de una técnica en sí, es una reflexión sobre las herramientas digitales dentro del taller de proyectos.

- 04 **Título:** Neurociencia del aprendizaje y la poiesis somática de la Arquitectura. [9]

Motivo de descarte: Establece la relación primordial entre la neurociencia del aprendizaje y la poiesis somática de la arquitectura, donde el estímulo de las emociones y sentimientos influyen en el proceso creativo. Propone estrategias didácticas como resultados pero no profundiza en las mismas.

- d. **Selección final de artículos.** Los 7 artículos finalmente seleccionados se analizaron a detalle y se clasificaron en una tabla general con los datos mencionados en la fase de metodología (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de artículos seleccionados. Elaboración propia.

Código	Nombre del artículo	Año	País	Técnica didáctica analizada	Objetivo Pedagógico	Intersección con otras disciplinas y/o materias	Materia de aplicación
TD	Maquetas experimentales para conceptualizar arquitectura.[10]	2022	México	Maquetas experimentales y proceso guiado.	Conceptualización de forma y estructura.	No especifica	Talleres de proyectos de nivel medio y nivel avanzado
TD	Mi taller es el barrio.[11]	2019	Ecuador	1. Visitas guiadas mapeo sensorial 2. Urbanismo táctico	1. Introducir a los estudiantes a la comunidad y ayudarlos	Comunicación, antropología,	Taller de proyectos y diseño urbano

3. Narrativa histórica
4. Taller galería
5. Urbanismo táctico
6. Narrativa histórica
7. Taller galería

- a sumergirse en la historia y la vida del barrio donde diseñarán. Análisis profundo del contexto
2. Intervenir en la ciudad a pequeña escala y en el corto plazo.
3. Entender la historia de la comunidad.
4. Trabajo en sitio con las personas del barrio.
5. Intervenir en la ciudad a pequeña escala y en el corto plazo.
6. Entender la historia de la comunidad.
7. Trabajo en sitio con las personas del barrio.

geografía,
biología.
Pedagogía
Historia,
Artistas
urbanos

HD	Dispositivos pedagógicos de iniciación al proyecto arquitectónico. [12]	2022	Costa Rica	Dispositivos agrupados en categorías: desfamiliarización, construcción, cinestesia, organización, abstracción	Desarrollar habilidades fundamentales para la práctica del proyecto arquitectónico través de ejercicios prácticos y manipulativos	Serie de principios básicos de diseño y composición visual comunes a varias disciplinas artísticas y proyectuales.	Primer taller de proyectos, específicamente, entre el inicio del curso y el primer ejercicio que involucra la proyección de edificios
HD	Dispositivos versus simuladores en la iniciación al proyecto arquitectónico. [13]	2023	Costa Rica	Simuladores y dispositivos	1. Brindar a los estudiantes las herramientas necesarias para operar dentro de la profesión. Proceso de formación enfocado en el ejercicio profesional. 2. Desviarse de los supuestos tradicionales de la profesión. Se intentan descubrir nuevas formas de ver y entender los edificios y los entornos.	No especifica	Primer taller de proyectos
HD	La arquitectura regional como referencia didáctica para el taller de proyectos de arquitectura.[14]	2015	México	Análisis de arquitectura regional norestense para identificar elementos y totalidades arquitectónicas afines a una tipología.	Integrar e identificar la totalidad arquitectónica desde el análisis de casos construidos regionales.	Composición	Taller de proyectos
OP	Jugar= habitar. Lecciones de investigación y didáctica para la arquitectura.[15]	2019	Colombia	Prueba del ajedrez	Fortalecer la noción de investigación como principio y fundamento de los procesos de creación y diseño.	Puede aplicarse en cualquier disciplina de diseño.	Taller de proyectos
OP	La metodología en el campo de la representación en el proceso de enseñanza-aprendizaje del diseño. Caso de estudio: taller de proyectos arquitectónicos.[16]	2023	México	Representación gráfica como aproximación al desarrollo de la idea creativa.	Desarrollar habilidades y actitudes formales para dar solución a los proyectos plantea dos, en donde la investigación y la conceptualización son partes inseparables.	No especifica	Taller de proyectos

e. **Síntesis de la información.** Después de una síntesis de la información obtenida en la tabla general se

obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 5).

Tabla 5. Síntesis de países. Elaboración propia.

País con más información	Cantidad de artículos
México	3
Costa Rica	2
Colombia	1
Ecuador	1

De acuerdo con los objetivos pedagógicos se pueden clasificar los observados en 3 categorías. (Tabla 6).

Tabla 6. Síntesis de objetivos pedagógicos. Elaboración propia.

Objetivos pedagógicos	Cantidad de artículos
Investigación, proceso de diseño y competencias laborales	3
Conexión y entendimiento del contexto.	2
Fomento a la creatividad y conceptualización.	2

Sobre la intersección con otras disciplinas o materias la información obtenida es la siguiente (Tabla 7).

Tabla 7. Síntesis de interrelación disciplinar. Elaboración propia.

Interrelación disciplinar	Cantidad de artículos
No específica	3
Composición	1
Ciencias sociales y naturales	1
Disciplinas afines al diseño	2

Por último, con relación a las materias donde se aplicaron las técnicas analizadas en los artículos seleccionados se pueden distinguir las siguientes (Tabla 8).

Tabla 8. Síntesis de materias de aplicación. Elaboración propia.

Materia de aplicación de la técnica	Cantidad de artículos
Taller de proyectos – Primeros cursos	2
Taller de proyectos – niveles medios y avanzados	1
Taller de proyectos en general	3
Taller de proyectos y diseño urbano	1

Posterior a realizar la revisión bibliográfica propuesta, el presente artículo identifica que la enseñanza-aprendizaje de la arquitectura en los talleres de proyectos de Latinoamérica se caracteriza por una diversidad de objetivos pedagógicos, siendo en su mayoría enfocados a la investigación y desarrollo del proceso de diseño. Este enfoque responde a la demanda de profundización en la comprensión de los problemas a resolver mediante el diseño arquitectónico. Este énfasis en la experiencia profesional evidencia la tendencia a priorizar el “entrenamiento” técnico y profesional sobre la formación de personas críticas [17]. El enfoque orientado a competencias puede limitar el desarrollo de habilidades de razonamiento crítico y exploración creativa.

En cuanto a la interdisciplinariedad, el análisis revela una importante limitación: aproximadamente un 42% de las técnicas didácticas no especifican una interrelación disciplinar y otro 42% se enfocan en relaciones con materias propias del diseño y/o disciplinas afines. Solo alrededor de un 14% declaran específicamente la interdisciplina aplicada en las técnicas analizadas. Estos resultados muestran la falta de una integración más amplia con otras áreas de conocimiento, lo que dificulta la capacidad de las y los estudiantes para abordar el diseño arquitectónico desde perspectivas más complejas.

La síntesis planteada dentro de la metodología arroja también que las técnicas analizadas se proponen en general para los talleres de proyecto sin importar avance en la currícula, sin embargo, se hace una mención especial al interés en enfocar los esfuerzos dentro de los primeros semestres de la formación de las y los futuros arquitectos con la finalidad de evitar problemas de entendimiento que sean más complicados de corregir en etapas avanzadas de la formación profesional. Se podría discutir también, sobre la integración de taller de

proyectos y urbanismo, identificando que los criterios y parámetros para diseño urbano, si bien son parecidos a los de diseño arquitectónico, tienen sus particularidades específicas.

La cantidad de resultados obtenidos evidencian el vacío disciplinar existente dentro de la formación en arquitectura y que para acercarse a una propuesta de replanteamiento efectivo, es indispensable repensar los objetivos y técnicas pedagógicas empleadas en la enseñanza de la arquitectura. Incluso esbozar la necesidad de una pedagogía específica en la misma.

4. Conclusiones

En conclusión, aunque las técnicas didácticas aplicadas en la enseñanza-aprendizaje de la arquitectura en Latinoamérica tienen el potencial de ofrecer una experiencia enriquecedora y formadora, el presente artículo identifica los siguientes retos que afectan su efectividad:

1. La poca implementación de técnicas didácticas con objetivos exploratorios por enfocarse a casos prácticos y a las dinámicas del campo laboral, obstaculizan la posibilidad de formar profesionales críticos de su quehacer.

2. La intención de enfocar los esfuerzos de experimentación creativa en los primeros semestres e ir profesionalizando las técnicas didácticas dentro del taller de proyectos conforme avanza la formación de cada estudiante en la currícula emerge como una propuesta que fomenta el balance entre los ejercicios experimentales y los prácticos/laborales, lo que evitaría problemas epistémicos en etapas avanzadas de la formación profesional.

3. La falta de conexión con otras disciplinas, incluso ajenas a la esfera del diseño, dificultan la capacidad de las y los estudiantes de

relacionar a la arquitectura con un mundo cada vez más complejo.

4. Es importante identificar con claridad las etapas proyectuales, objetivos y temáticas que se quieren plantear con cada técnica didáctica, así como el objetivo pedagógico particular para que al plantear los ejercicios dentro de los talleres de proyectos, se puedan diferenciar y enfocar esfuerzos para lograr los objetivos planteados a través de técnicas coherentes y que logren sus objetivos de manera satisfactoria.

Agradecimientos

La autora y los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Querétaro por los recursos otorgados para la realización de esta investigación.

Referencias

- [1] A. Flores-Gutiérrez y G. I. López Domínguez, “Un objetivo común en el diseño arquitectónico: fundamentación de una práctica desde el paradigma del espacio arquitectónico como ambiente del ser humano.”, *Investig. Diseño*, vol. 5, pp. 41–55, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.xoc.uam.mx/Recurso.php>
- [2] A. Flores-Gutiérrez, “Del concepto formal a la conceptualización sistémica en el diseño arquitectónico”, *Contexto*, vol. 14, núm. 20, pp. 115–123, abr. 2020, doi: 10.29105/contexto14.20-7.
- [3] D. M. Barrios, “Hacia una filosofía de la arquitectura”, en *Aedificare 2005: anuario de investigaciones de la Facultad de Arquitectura*, 1a ed., A. B. Narváez Tijerina, Ed., San Nicolás de los Garza, N.L.: Facultad de Arquitectura de la UANL, 2005, pp. 11–73.
- [4] B. Colomina, I. G. Galán, E. Kotsioris, y A.-M. Meister, “Pedagogías radicales: Reimaginando los protocolos disciplinares de la arquitectura”, *Mater. Arquít.*, núm. 14, pp. 32–45, jun. 2017, doi: 10.56255/ma.v0i14.13.
- [5] B. de S. Santos, “Introducción: las epistemologías del sur”, en *Formas-otras: saber, nombrar, narrar, hacer*, Barcelona: CIDOB, 2011.
- [6] A. P. León U., D. B. Rendón L., y O. L. García J., “Desarrollos y experiencias a partir de la práctica pedagógica en las facultades de educación de la zona centro del Colombia: Estado actual de la

- investigación”, en *Revolución en la Formación y la Capacitación para el Siglo XXI*, Primera., E. Serna M., Ed., Medellín, Antioquia: Instituto Antioqueño de Investigación, 2018.
- [7] M. G. Vargas Serrano y H. G. Montserrat Paola, Eds., “Los grandes retos en la formación de profesionales y las nuevas tendencias de la Arquitectura”, en *Escenarios de la educación del diseño y la arquitectura. Visión actual y futura*, 1a., Universidad Autónoma Metropolitana., 2023, pp. 47–64. doi: 10.24275/uama.10104.10106.
- [8] J. Oquendo Valenzuela, “¿Cómo integrar herramientas y habilidades tecnológicas y digitales, en los procesos sensibles y proyectuales que exige el taller de proyectos de arquitectura?” Fundación Universitaria del Área Andina, marzo de 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/42264324/Articulo_sobre_integraci%C3%B3n_de_herramientas_tecnol%C3%B3gicas_en_procesos_sensibles_de_la_arquitectura
- [9] C. F. Martínez Vitor y S. S. Salva-Pérez, “Neurociencia del aprendizaje y la poiesis somática de la Arquitectura”, *Estoa*, vol. 10, núm. 19, pp. 55–65, ene. 2021, doi: 10.18537/est.v010.n019.a05.
- [10] G. Z. Mónica y O. T. Juan Carlos, “Maquetas experimentales para conceptualizar arquitectura”, en *XIX Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica, junio 2022*, Universidad Politécnica de Cartagena, sep. 2022. doi: 10.31428/10317/11422.
- [11] A. M. Durán Calisto y C. Van Sluys, “Mi taller es el barrio”, en *VII Jornadas sobre Innovación Docente en Arquitectura (JIDA '19), Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 14 y 15 de Noviembre de 2019: libro de actas*, Grup per a la Innovació i la Logística Docent en l'Arquitectura (GILDA), nov. 2019, pp. 442–458. doi: 10.5821/jida.2019.8356.
- [12] J. I. Lee Camacho, “Dispositivos pedagógicos de iniciación al proyecto arquitectónico”, *Rev. Arqut.*, vol. 27, núm. 43, pp. 120–139, dic. 2022, doi: 10.5354/0719-5427.2022.67909.
- [13] J. I. Lee Camacho, “Dispositivos versus Simuladores en la iniciación al proyecto arquitectónico”, en *XI Jornadas sobre Innovación Docente en Arquitectura (JIDA '23), Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Granada, 16 y 17 de Noviembre de 2023: libro de actas*, Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, nov. 2023, pp. 610–622. doi: 10.5821/jida.2023.12292.
- [14] A. Tamez Tejeda, “La arquitectura regional como referencia didáctica para el taller de proyectos de arquitectura”, en *La ciudad. Un constructo social antropogénico*, Primera., E. Sousa González, E. Cadena Vargas, y A. Palacios Barra, Eds., Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad Autónoma del Estado de México, Universidad del Bío-Bío, 2014.
- [15] A. Gonzalez, “Jugar = Habitar: Lecciones de investigación y didáctica para la arquitectura”, *Arquit. Sur*, vol. 37, núm. 56, pp. 54–69, nov. 2019, doi: 10.22320/07196466.2019.37.056.04.
- [16] M. González Castañeda, E. Galindo Flores, y D. Rodríguez Medina, “La metodología en el campo de la representación en el proceso de enseñanza-aprendizaje del diseño. Caso de estudio: taller de proyectos arquitectónicos”, en *Investigación y conceptualización del diseño*, 1a. ed., L. M. Á. Herrera Batista, M. A. Marín Álvarez, Y. Alatríste Martínez, A. Acero Gutiérrez, y B. I. Mejía Modesto, Eds., Universidad Autónoma Metropolitana., 2023. doi: 10.24275/uama.396.10201.
- [17] A. M. A. Freire, Ed., *Pedagogía de la indignación: cartas pedagógicas en un mundo revuelto*, Primera edición. México, D.F.: Siglo Veintiuno Editores, 2016.

Adquisición de base de datos para entrenamiento de algoritmo de Deep Learning para sistema ADAS

Database acquisition for training a Deep Learning algorithm for an ADAS

Victor Jose Ortiz Granados¹, Salvador Martínez-Cruz¹, Oscar David De Jesús Días¹.

¹Maestría en Ciencias (Mecatrónica), DIPFI, UAQ, Facultad de Ingeniería, San Juan del Río, Querétaro, México

vortiz26@alumnos.uaq.mx

Palabras clave: Procesamiento de imágenes, ADAS, Bases de datos, adquisición, aumento de datos, Deep Learning.

Resumen- Los sistemas de asistencia al conductor (ADAS, por sus siglas en inglés) adquieren información del entorno por medio de sensores de visión, y con algoritmos de Deep Learning (DL) realizan la tarea de detectar obstáculos, y evadirlos o alertar al conductor de la presencia de estos. Para el entrenamiento de los algoritmos de DL en sistemas de visión, es importante contar con bases de datos que contengan imágenes que se acerquen a la realidad. Por esta razón, en este artículo se presenta un método para la creación de base de datos que consiste en capturar 2000 imágenes por clase: infraestructura, peatón, vehículo y ruta libre. Posteriormente se aplica un procesamiento de imágenes para obtener la base de datos en su versión final, utilizando extracción de áreas de interés, umbralización y multiplicación de imágenes hasta obtener una base de datos de al menos 2,000 imágenes en total, que servirá para un clasificador basado en Deep Learning aplicado a un sistema ADAS en un vehículo automotor. Los resultados del trabajo muestran una base de datos con 8,000 imágenes en total con un tamaño de 28×28 píxeles cada una. Además, en una primera prueba se muestra que el algoritmo de Deep Learning es capaz de ser entrenado con la base de datos desarrollada obteniendo una precisión de 96.88%.

Keywords: Image processing, ADAS, databases, acquisition, data augmentation, Deep Learning.

Abstract- Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) acquire information from the environment through vision sensors, and with Deep Learning (DL) algorithms, they perform the task of detecting obstacles, avoiding them, or alerting the driver of their presence. For training DL algorithms in vision systems, it is important to have datasets that contain images that closely resemble real-world scenarios. For this reason, this paper presents a method for creating a database consisting of capturing 2,000 images per class: infrastructure, pedestrian, vehicle, and free path. Subsequently, image processing is applied to obtain the final version of the database, using region of interest cropping, thresholding, and image multiplication until obtaining a database of at least 2,000 images in total, which will be used for a classifier based on Deep Learning applied to an ADAS in an automotive vehicle. The results of this work show a database with a total of 8,000 images, each with a size of 28×28 pixels. Furthermore, in an initial test, it is shown that the Deep Learning algorithm can be trained with the developed dataset, achieving an accuracy of 96.88%.

1. Introducción

De acuerdo con la Organización mundial de la Salud (OMS), En 2021 hubo 1.19 millones de muertes a causa de accidentes de tránsito [1], y en México alrededor de 13,630

sinistros, siendo los peatones los más afectados [2]. Debido a esta problemática, los Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS, por sus siglas en inglés) han tenido gran relevancia al ayudar a disminuir los accidentes de tránsito, delegando la toma de decisiones al vehículo [3] como el

control de cruceo adaptativo (ACC), mantenimiento de carril (LK), frenado de emergencia automático para evasión de colisiones (EBA) [4], [5], [6]. También, los sistemas ADAS adquieren información del entorno mediante sensores de visión y procesamiento con algoritmos de Deep Learning (DL), los cuales se fundamentan en las redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés) que tratan de simular el arreglo de conexiones en el cerebro, permitiendo así procesar información cruda, como una imagen, eliminando la necesidad de aplicar cálculos de características [7]. Un ejemplo es la función de detección de punto ciego (BSD, por sus siglas en inglés) implementada en [8], en la cual usan una base de datos ya existente con 2,000 imágenes de vehículos y 9,000 imágenes que no contenían vehículos, escalándolas a 60×60 píxeles para aplicar un Histograma de Gradiente Orientado, y así utilizar esas imágenes como entrada a una red neuronal completamente conectada. Se debe considerar que la calidad y el contexto de los datos es esencial para el desempeño de los algoritmos de DL como se menciona en [9], donde se utiliza una base de datos adquirida por ellos con 46,355 muestras para entrenar una ANN de memoria a corto y largo plazo. Es notable que la obtención de las bases de datos es un campo muy importante como se menciona en [10], donde capturaron una base de datos de 26,336 imágenes de carreteras. Otra base de datos capturada para realizar clasificación de malezas multiclases para algoritmos de DL se muestra en [11], la cual cuenta con 17,509 imágenes etiquetadas. Además de la captura de las bases de datos, otra característica importante de los sistemas de visión para sistemas ADAS que se menciona en [12] es la importancia de los sistemas de visión, al poder ser incorporados a sistemas embebidos, pero que enfrenan ciertos retos como el tamaño, bajo consumo de energía y su costo.

Con base en la literatura revisada, se puede inferir que la adquisición de bases de datos para sistemas ADAS es fundamental, ya que se utilizan en el entrenamiento de algoritmos de DL implementados en funciones como: LK, BSD o ACC, diseñadas para la identificación de peatones, vehículos, señales de tránsito e infraestructura. En ese sentido, este artículo destaca la adquisición y acondicionamiento de una base de datos basado en imágenes para cuatro clases: peatón, vehículo, infraestructura y camino libre, con 2,000 imágenes cada una obteniendo un total de 8,000 imágenes. Posteriormente se aplican técnicas de umbralización y escalamiento para obtener imágenes binarias de 28×28 píxeles que se usa como entrada al clasificador DL. Esta base de datos se utiliza para el entrenamiento y validación del método de DL en un sistema ADAS para evasión de colisiones.

2. Puesta experimental

En esta sección se muestra el procedimiento seguido para la puesta experimental.

A. Captura de base de datos

Para obtener las imágenes de la base de datos de forma automática, se diseña un algoritmo con un tiempo de captura de imagen cada 100 ms, y se deja correr el código hasta obtener 2,000 imágenes por clase variando el ángulo de captura en la cámara, distancia hacia el objeto de interés y considerando que se encuentre centrado a lo largo del tiempo de captura. En la Tabla 1 se muestra el pseudocódigo desarrollado para la obtención las imágenes para la base de datos.

Tabla 1: Pseudocódigo para captura de imágenes.

1. $i = 0$;
2. $N = 2000$ % número de imágenes a capturar
3. $t_c = 100$ % tiempo de espera entre capturas
4. % Accede a la cámara digital

5. % Se termina el ciclo cuando i es igual a N
6. while $i < N$
7. Lee la imagen de la cámara
8. Muestra imagen
9. Guarda la imagen nombre " i ".jpg
10. $i = i + 1$
11. Si se introduce la letra "Q" Termina programa
12. Cierra pantalla
13. Desactiva la cámara

De esta forma, se adquieren las imágenes necesarias de una manera práctica y rápida, para después procesarlas y acondicionar una base de datos específica para entrenamiento de algoritmos de DL en sistemas ADAS.

B. Configuración de vehículo hospedador

Para la captura de las imágenes se utiliza una cámara Logitech® C920, la cual se instala al tablero de un vehículo hospedador como se muestra en la **Fig. 1** para obtener la perspectiva del vehículo en su navegación, y junto con un ordenador que ejecuta el algoritmo de captura de imágenes.



Fig. 1: Vehículo con el sistema de adquisición de datos

En la **Fig. 1** se muestra la cámara incorporada en el vehículo y el ordenador que ejecuta el código para la captura de imágenes, permitiendo conducir en la vialidad para adquirir las imágenes que sean necesarias de

manera simultánea, tratando de asemejar los escenarios a un entorno real. Para capturar las imágenes, se conduce el vehículo hospedador acondicionado con el sistema en un estacionamiento de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro como se muestra en la **Fig. 2**.



Fig. 2: Escenario de la puesta experimental para la captura de imágenes.

En la **Fig. 2** se muestran tres zonas donde se capturan las imágenes de las 4 clases: vehículo, infraestructura, peatón y camino libre. La zona del rectángulo amarillo se usa para el desplazamiento de los peatones durante la captura. En la zona encerrada con el rectángulo verde se coloca un vehículo estacionario, así como la infraestructura para la captura de imágenes, respectivamente. La zona encerrada en el rectángulo punteado rojo se usa para desplazar el vehículo hospedador y capturar las imágenes desde diferentes ángulos y distancias. Este procedimiento se realiza bajo las siguientes condiciones: 1. Luz de día natural clara, 2. Mismo horario y 3. Misma densidad de presencia peatonal y vehicular, para que la información sea coherente.

C. Extracción de regiones de interés

Una vez adquiridas las imágenes, se realiza una extracción de las regiones de interés (RDIs) en cada clase. En la **Fig. 3** se muestra este proceso de extracción y cómo se almacena en una carpeta específica para cada clase.



Fig. 3: a) Extracción de RDIs que contiene la clase a identificar.

Al obtener las carpetas con las RDIs extraídas, se aplica un aumento de datos y un preprocesamiento para adecuar cada muestra a la entrada específica de una red neuronal.

D. Aumento de datos

Al finalizar la etapa de captura de imágenes se discrimina la información, manteniendo solo las imágenes que contienen la información de interés en cada clase. Por esta razón, se utiliza el aumento de datos para completar las 2,000 imágenes que conforman cada clase. Para incrementar el número de imágenes se aplica rotación y desplazamiento hasta obtener el número adecuado de muestras por clase, en este caso 2,000 imágenes. Esto permite robustecer el entrenamiento del algoritmo de DL. El pseudocódigo se muestra la Tabla 2.

Tabla 2: Pseudocódigo para multiplicación de imágenes.

1. Acceder a la ruta de carpeta con las imágenes segmentada
2. Numero de imágenes requeridas $N = 2,000$
3. Obtener la cantidad de imágenes que hay en la carpeta $M = \text{imágenes en carpeta}$
4. Si $M \geq N$ entonces no se requieren más imágenes y terminar programa
5. Imágenes restantes $N_{NI} = N - M$
6. **para** $i = 0$ **hasta** N_{NI}
7. Accede a imagen i de la carpeta
8. Rota imagen un ángulo $\theta = i \cdot 360 / N_{NI}$
9. Guarda imagen rotada en la carpeta con imágenes segmentadas
10. Termina programa

Con este método, se garantiza la captura de una base de datos con 2000 imágenes por cada una de las 4 clases.

E. Umbralización y escalamiento

Una vez que cada clase contiene 2000 imágenes, se realiza una umbralización y un escalamiento para que todas las imágenes estén conformadas por un tamaño 28×28 pixeles, para usarlas como señales de entrada en el algoritmo de DL. El pseudocódigo de este proceso se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Pseudocódigo para umbralización y escalamiento.

1. Image_number = 2000 % número de imágenes
2. Size_new = 28×28 % Nuevo tamaño
3. Umbral_level = 150 % Nivel de umbralización
4. **para** $i=0$ **hasta** Image_number % Se rompe el ciclo cuando se completa el número de imágenes (2000)
5. Escalar imagen a nuevo tamaño
6. Aplicar umbralización
7. Guardar imagen en carpeta de nueva

En la Fig. 4 se muestra visualmente el proceso aplicado a una imagen.



Fig. 4: Acondicionamiento de imágenes que conforman la base de Datos

Teniendo así, acondicionada la base de datos para entrenar el algoritmo de DL.

F. Algoritmo de Deep Learning

Para validar el acondicionamiento de la base de datos, se utiliza un algoritmo de DL, en específico una red neuronal completamente conectada, en la **Fig. 5** se muestra el proceso implementado para realizar esta validación.

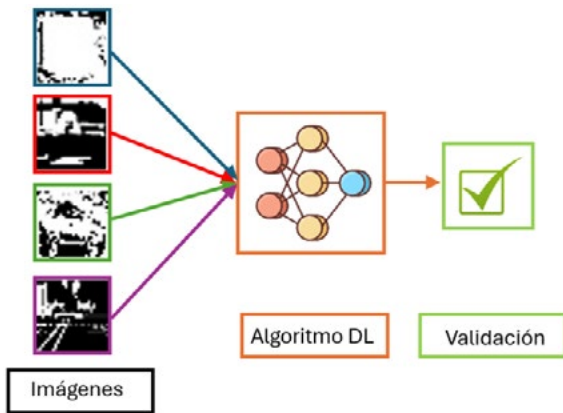


Fig. 5: Proceso de entrenamiento de red neuronal completamente conectada para validar la base de datos.

En la **Fig. 5** se muestran las imágenes como entrada para el algoritmo DL en su entrenamiento, donde se utiliza el valor de la precisión y la matriz de confusión para validar el acondicionamiento de la Base de Datos

3. Resultados y discusión

A. Captura de imágenes

Se llevó a cabo el experimento conduciendo el vehículo hospedador

Al implementar el algoritmo de la captura de imágenes, y correr las pruebas en el vehículo hospedador en el área descrita en las zonas descritas en secciones anteriores, se obtienen las imágenes de las 4 clases mostradas en la **Fig. 6**.

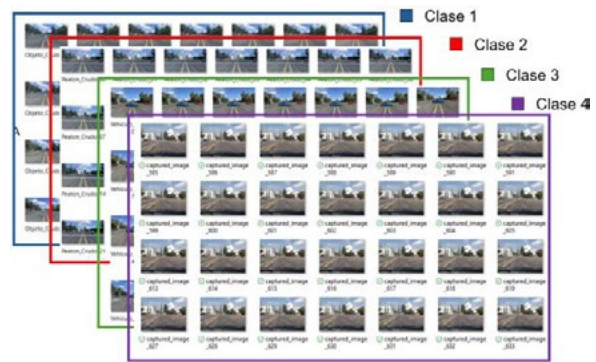


Fig. 6: Imágenes capturadas durante las pruebas.

Al tener capturadas y almacenadas las imágenes, se aplica la selección de RDIs, umbralización y escalamiento para acondicionar la base de datos.

B. Base de datos acondicionada

Se obtienen las imágenes de las clases umbralizadas, escaladas y trasladadas mostradas en la **Fig. 7**.

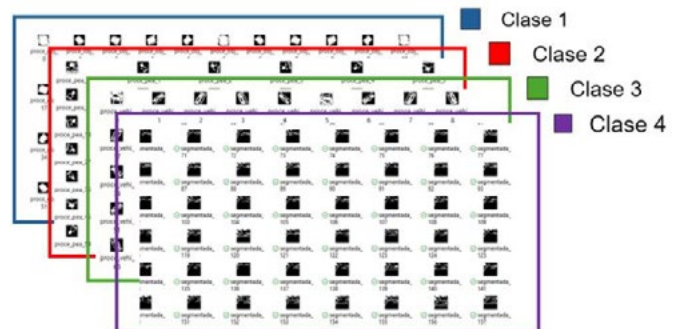


Fig. 7: Base de datos acondicionada de 4 clases, con 2,000 imágenes umbralizadas y escaladas por clase.

Con esto se obtiene una base de datos acondicionada para el entrenamiento de un algoritmo DL que requiera como entradas imágenes umbralizadas con tamaño 28×28 .

C. Validación de DL

La base de datos es utilizada para entrenar un algoritmo de DL, en este se utiliza una red completamente conectada para esta prueba. En

la **Fig. 8** se muestra el proceso de entrenamiento.

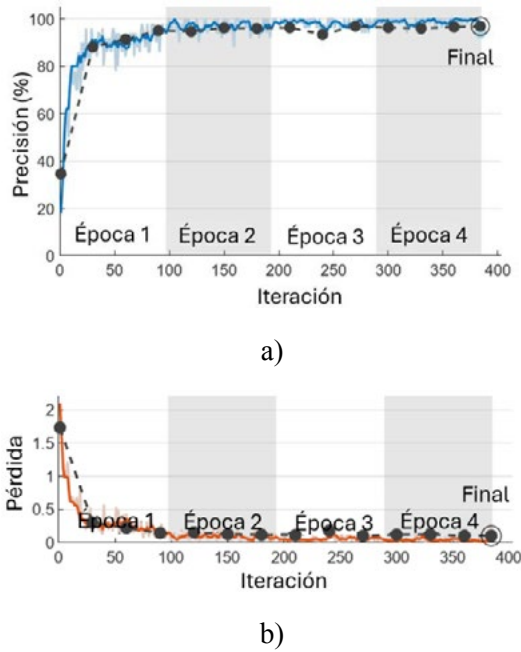


Fig. 8: a) Precisión y b) pérdida de las predicciones durante el entrenamiento del algoritmo de DL.

Con base en las imágenes **Fig. 8a** se puede apreciar cómo la clasificación de las imágenes mejora mientras avanzan las épocas del entrenamiento, teniendo un valor final de exactitud de 96.50%. En la **Fig. 9** se muestra la matriz de confusión resultante de la etapa de prueba.

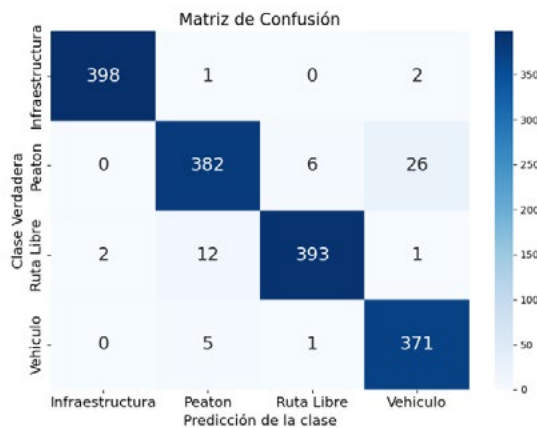


Fig. 9: Matriz de confusión en etapa de prueba del algoritmo de DL.

Como se puede apreciar en la **Fig. 9**, se muestra que la clase que más tuvo verdaderos positivos fue infraestructura. Mientras que la clase con menos verdaderos positivos fue vehículo, además de ubicar 26 falsos negativos de la clase vehículo en la clase perteneciente a peatón. De igual manera, esto aplica con la segunda clase con menor número de verdaderos positivos que pertenece a peatón, donde ubicó 12 y 5 falsos positivos en las clases de ruta libre y vehículo, respectivamente.

D. Comparación con trabajos similares

En la Tabla 4 se muestra una comparación del trabajo de este trabajo con otros trabajos similares.

Tabla 4: Comparación con trabajos similares

Artículo	Base de datos propia	Precisión
Kwon, D. [8]	No	98.99%
Jeong, Y [9]	Sí	No documentado
Arya, D [10]	Sí	No documentado
Propuesta	Si	96.5%

En la Tabla 4 se muestra una comparación con otros trabajos similares, donde se observa que sólo en 2 de ellos se usó una base de datos propia, sin embargo, en ambos no reportan si su adquisición fue adecuada, además de que en [10] solo se enfoca en la obtención de dicha base de datos, mientras que en [9] no reportan porcentajes de precisión porque su objetivo es obtener un ángulo con base en la clasificación de su sistema. Mientras que el trabajo en [8] logra una precisión de 98.99%, sin embargo, emplean técnicas que requieren más operaciones computacionales como lo es escalar la imagen a un tamaño 60×60 píxeles o manejar la misma con colores, además de una segmentación por zonas en dicha imagen.

4. Conclusiones

En este trabajo, se presentó la adquisición y acondicionamiento de una base de datos para el entrenamiento de un algoritmo de DL para un sistema ADAS, capturando imágenes en un vehículo hospedador acondicionado con una cámara digital Logitech® C920 y un ordenador. Se aplicó extracción de áreas de interés, umbralización y escalamiento a todas las imágenes y se validó el acondicionamiento de estas entrenando una red neuronal completamente conectada obteniendo una exactitud del 96.50%. Teniendo como base la matriz de confusión, se aprecia que la clase de infraestructura es la clase clasificación tuvo en comparación a las demás clases. También, las clases restantes: peatón, ruta libre y vehículo, fueron las clases que más se confundían entre ellas, esto es debido a que los escenarios en los que se encuentran son muy similares, puesto que están rodeados de características similares en su entorno, esto puede mejorarse modificando el nivel de umbralización o tamaño de píxeles de imágenes. La metodología de este trabajo aporta en la obtención de bases de datos que requieran capturar una gran cantidad de imágenes para entrenamiento de algoritmos de DL, adecuándola a los contextos específicos y en entornos reales, para utilizarlos en aplicaciones vehiculares de desarrollos de sistemas ADAS, que trabajen con sistemas de visión y algoritmos de DL. En prospectivas futuras, esta metodología pretende ser utilizada en el desarrollo de un sistema ADAS para emergencia en colisiones frontales.

Referencias

- [1] W. World Health Organization, "Global Status report on Road Safety," 2023.
- [2] S. Secretaría de Salud, "Informe Sobre Seguridad Vial," 2021.
- [3] A. Ziebinski, R. Cupek, D. Grzechca, and L. Chruszczyk, "Review of advanced driver

- assistance systems (ADAS)," *AIP Conf Proc*, vol. 1906, 2017, doi: 10.1063/1.5012394.
- [4] S. Magdici and M. Althoff, "Adaptive Cruise Control with Safety Guarantees for Autonomous Vehicles," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 5774–5781, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.418.
- [5] X. Xu, J. W. Grizzle, P. Tabuada, and A. D. Ames, "Correctness Guarantees for the Composition of Lane Keeping and Adaptive Cruise Control," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 1216–1229, 2018, doi: 10.1109/TASE.2017.2760863.
- [6] M. Vajedi and N. L. Azad, "Ecological adaptive cruise controller for plug-in hybrid electric vehicles using nonlinear model predictive control," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 113–122, 2016, doi: 10.1109/TITS.2015.2462843.
- [7] Y. Lecun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," May 27, 2015, *Nature Publishing Group*. doi: 10.1038/nature14539.
- [8] D. Kwon, R. Malaiya, G. Yoon, J. T. Ryu, and S. Y. Pi, "A study on development of the camera-based blind spot detection system using the deep learning methodology," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 14, 2019, doi: 10.3390/app9142941.
- [9] Y. Jeong, "Interactive Lane Keeping System for Autonomous Vehicles Using LSTM-RNN Considering Driving Environments," *Sensors*, vol. 22, no. 24, 2022, doi: 10.3390/s22249889.
- [10] D. Arya, H. Maeda, S. K. Ghosh, D. Toshniwal, and Y. Sekimoto, "RDD2020: An annotated image dataset for automatic road damage detection using deep learning," *Data Brief*, vol. 36, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.dib.2021.107133.
- [11] A. Olsen *et al.*, "DeepWeeds: A Multiclass Weed Species Image Dataset for Deep Learning," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-018-38343-3.
- [12] G. Velez and O. Otaegui, "Embedding vision-based advanced driver assistance systems: A survey," Apr. 01, 2017, *Institution of Engineering and Technology*. doi: 10.1049/iet-its.2016.0026.

Optimización de Armaduras para Nave Industrial mediante Algoritmos Enjambre de Peces Artificiales y Búsqueda Armónica

Industrial Warehouse Truss Optimization via Artificial Fish Swarm Algorithms and Harmonic Search

Ponce Olguín Risieri Rafael¹, Ponce López Emiliano²
División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Santiago de Querétaro, Querétaro, México
¹r.rafael.ol@outlook.com, ²tartolas18@gmail.com

Palabras clave: EST., algoritmos metaheurísticos, diseño estructural, inteligencia artificial aplicada, optimización de tamaño, optimización multiobjetivo.

Resumen- La optimización de estructuras tipo armadura ha sido un tema de gran relevancia en la Ingeniería Civil a nivel mundial, normalmente se basa en el objetivo de reducir el peso total de la armadura mediante la selección de secciones estructurales óptimas, logrando obtener una estructura lo más ligera posible y a su vez económica, todo esto sin comprometer la integridad y seguridad estructural. En este artículo se utilizó una armadura compuesta de 161 barras para evaluar los algoritmos de “*Artificial Fish Swarm Algorithm*” (AFSA) y “*Harmony Search*” (HS) considerando poblaciones del mismo tamaño y mismos rangos de iteración con la finalidad de comparar ambos métodos en el área de optimización de armaduras, donde la función objetivo para este estudio es la minimización del peso total de la estructura bajo las mismas restricciones de integridad y seguridad estructural. De acuerdo con los resultados, ambos métodos son eficaces en la optimización del caso de estudio planteado, sin embargo, se observa que el algoritmo AFSA logró demostrar una mayor consistencia de obtener una solución global que el algoritmo HS con un mismo número de iteraciones máximas, ambos algoritmos demostraron ser capaces de obtener una solución global, lo que los hace una opción para la optimización de estructuras.

Keywords: EST., metaheuristic algorithms, structural design, applied artificial intelligence, size optimization, multi-objective optimization.

Abstract- The optimization of truss structures has been a topic of great relevance in Civil Engineering worldwide, typically aimed at reducing the total weight of the truss by selecting optimal structural sections, achieving a structure that is as lightweight and economical as possible, without compromising structural integrity and safety. In this article, a truss composed of 161 bars was used to evaluate the Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA) and Harmony Search (HS) algorithms, considering populations of the same size and the same iteration ranges, with the goal of comparing both methods in the area of truss optimization. The objective function for this study is the minimization of the total weight of the structure under the same structural integrity and safety constraints. According to the results, both methods are effective in optimizing the proposed study case, however, it is observed that the AFSA algorithm managed to demonstrate greater consistency in obtaining a global solution than the HS algorithm with the same number of maximum iterations, both algorithms proved to be capable of obtaining a global solution, which makes them an option for optimizing structures.

1. Introducción

La optimización de una estructura trata de obtener soluciones eficientes, sustentables, económicas, funcionales y que cumplan con los requerimientos de seguridad estructural vigentes [1], una solución económica normalmente se basa en minimizar el peso de la estructura, este proceso es tardado e interactivo mediante métodos tradicionales [2], debido a esto, se han desarrollado diversas aplicaciones a través de una gran diversidad de métodos metaheurísticos en la ingeniería civil, especialmente en la ingeniería estructural. Hoy en día existen diversos tipos de algoritmos de optimización; en [3] se optimizó el tamaño y tipología de una armadura utilizando el algoritmo genético básico; en [4] combinaron la búsqueda local gaussiana y un algoritmo optimización de enjambre de partículas con aprendizaje integral mejorado para la optimización de armaduras; en [5] se evaluaron distintos algoritmos como algoritmo de polinización de lores, colonia de abejas artificiales, algoritmo murciélago, algoritmo Jaya, optimización lobo gris y la búsqueda armónica para compararlos con la modificación de vuelo de Levi.

La mayor área de aplicación de la optimización basada en métodos metaheurísticos en la ingeniería estructural es las estructuras tipo armadura [5]. Este trabajo se enfoca en la comparación de dos métodos de optimización de una armadura de 161 barras como caso de estudio utilizando las especificaciones del “*Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-22)*” [6], mediante la aplicación del algoritmo AFSA [9-12] y HS [13-15], para obtener los parámetros de diseño óptimos, incluyendo las secciones estructurales, cuya función objetivo es minimizar el peso total, lo cual conlleva a un menor costo de la estructura.

2. Metodología

Los algoritmos utilizados son “*Artificial Fish Swarm Algorithm*” y “*Harmony Search*”, AFSA es un algoritmo inspirado en la naturaleza, mientras HS está inspirado en la música.

a) Función Objetivo

El objetivo de la optimización de armaduras es minimizar el peso total de la estructura, esto se describe con la Ec. (1):

$$\text{Minimizar } W_j = \gamma \sum_{i=1}^{ne} L_i A_i * R \quad (1)$$

donde:

- W_j = Peso de la armadura j .
- γ = Peso específico del Acero.
- ne = Número de elementos.
- L_i = Longitud del elemento i .
- A_i = Área transversal del elemento i .
- R = Penalización por no cumplir las restricciones.

Las áreas transversales serán tipo HSS rectangulares seleccionadas dentro del catálogo presente en “*Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-22)*”

b) Restricciones

Para asegurar la seguridad, estabilidad y funcionalidad de la estructura se establecieron las restricciones de capacidad última a Tensión y Compresión según el ANSI/AISC 360-22, y la función de penalización se representa con la Ec. (2):

$$R = (1 + C)^2 \quad (2)$$

C es la suma de las penalizaciones para cada elemento y se representa con la Ec. (3):

$$C = \sum_{i=1}^{ne} C_R^i \quad (3)$$

Las penalizaciones por las restricciones de capacidad última C_R^i son representadas por la Ec. (4):

$$C_R^i = \begin{cases} \frac{P_{U(c,t)}^i - P_{R(c,t)}^i}{P_{R(c,t)}^i}, & P_{R(c,t)}^i < P_{U(c,t)}^i \\ 0, & P_{R(c,t)}^i \geq P_{U(c,t)}^i \end{cases} \quad (4)$$

donde:

- C_R^i = Penalización del elemento i .
- $P_{U(c,t)}^i$ = Carga ultima a compresión o tensión del elemento i .
- $P_{R(c,t)}^i$ = Resistencia ultima a compresión o tensión del elemento i .

La razón principal de utilizar la penalización exterior es eliminar la necesidad de una solución inicial factible.

c) Artificial Fish Swarm Algorithm

Se basa en la naturaleza del comportamiento de los peces para descubrir nuevas áreas de comida mediante la búsqueda individual o siguiendo a los demás peces, el algoritmo trata de imitar el comportamiento de los peces de búsqueda individual, seguimiento de otros peces y formar un enjambre. El procedimiento del algoritmo AFSA se ilustra en el *Pseudo Código No. 1*.

- *Comportamiento Búsqueda Individual.*

En este comportamiento el pez artificial (AF) busca una mejor posición dentro de su rango de visión, este proceso se trata de hacer un numero de terminado de intentos, si encuentra una mejor posición el AF se mueve un porcentaje aleatorio del paso máximo que puede dar el AF entre su posición actual y la mejor posición encontrada siguiendo la Ec. (5):

$$X_{ij} = X_i + \frac{X_j - X_i}{||X_j - X_i||} * Step * Rand() \quad (5)$$

donde:

- X_i = Posición Actual del AF_i .
- X_j = Posición dentro del rango de visión del AF_i .
- $Step$ = Tamaño del paso (distancia) que se puede desplazar el AF_i .
- $Rand()$ = Numero aleatorio entre 0 y 1.
- X_{ij} = Nueva posición del AF_i .

Si no se encuentra una mejor posición, el AF se mueve de manera aleatoria dentro de su rango de visión, con la Ec. (6):

$$X_{ij} = X_i + Vision * Rand() \quad (6)$$

donde:

- X_i = Posición Actual del AF_i .
- $Vision$ = Tamaño del rango de vista del AF_i .
- $Rand()$ = Numero aleatorio entre -1 y 1.
- X_{ij} = Nueva posición del AF_i .
- *Comportamiento Seguimiento.*

El AF se desplaza en dirección hacia el mejor vecino dentro de su rango visual siguiendo la Ec. (7):

$$X_{ij} = X_i + \frac{X_j - X_i}{||X_j - X_i||} * Step * Rand() \quad (7)$$

donde:

- X_i = Posición Actual del AF_i .
- X_j = Posición del vecino con mejor fitness dentro del rango de visión del AF_i .
- $Step$ = Tamaño del paso (distancia) que se puede desplazar el AF_i .
- $Rand()$ = Numero aleatorio entre 0 y 1.
- X_{ij} = Nueva posición del AF_i .

Si no existe algún vecino mejor fitness que el AF actual, se ejecuta el comportamiento de búsqueda individual.

- *Comportamiento Enjambre.*

El AF se agrupará en enjambres donde se garantice que se tiene una función objetivo mejor y se mueve hacia el centro de ese enjambre de acuerdo a la Ec. (8):

$$X_{ij} = X_i + \frac{X_c - X_i}{||X_c - X_i||} * Step * Rand() \quad (8)$$

donde:

- X_i = Posición Actual del AF_i .
- X_c = Posición de la posición central del enjambre de peces con mejor fitness que el AF_i actual.

- $Step$ = Tamaño del paso (distancia) que se puede desplazar el AF_i .
- $Rand()$ = Numero aleatorio entre 0 y 1.
- X_{ij} = Nueva posición del AF_i .

Si no existe algún enjambre con mejor fitness central que el AF actual, se ejecuta el comportamiento de búsqueda individual.

Algoritmo AFSA

Entrada: Tamaño de la población, rango visual, tamaño del paso, numero de intentos, factor de multitud, número de generaciones.

Función Objetivo $F(X_i)$, ($i = 1, 2, \dots, n$)

Inicialización de X_i por cada Pez Artificial AF_i ($i = 1, 2, \dots, n$) de manera aleatoria.

Por cada AF_i

Inicialización $X_i = rand()$.

Fin Por cada

Evaluar cada AF_i , $F(X_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$)

Por cada AF_i

$AF_{i,fitness} = F(X_i)$

Fin Por cada

$Mejor\_posición = arg.min(AF_{i,fitness})$

$Mejor\_solución = min(AF_{i,fitness})$

Repetir

Por cada AF_i

Calcular cuantos peces se encuentran dentro del rango visual (nf)

Si $nf > 0$ **entonces:**

Realizar el comportamiento de Seguimiento, obtener

$X_{i,seguimiento}$.

Realizar el comportamiento de Enjambre, obtener

$X_{i,enjambre}$.

Si $F(X_{i,seguimiento}) < F(X_{i,enjambre})$ **entonces:**

$X_i(t+1) = X_{i,seguimiento}$

De lo contrario:

$X_i(t+1) = X_{i,enjambre}$

Fin Si

De lo contrario:

Realizar el comportamiento de Búsqueda Individual, obtener $X_{i,busqueda}$.

$X_i(t+1) = X_{i,busqueda}$

Fin Si

$AF_{i,fitness}(t+1) = F(X_i(t+1))$

Si $AF_{i,fitness}(t+1) < Mejor\_Solución$ **entonces:**

$Mejor\_posición = X_i(t+1)$

$Mejor\_solución = AF_{i,fitness}(t+1)$

Fin Si

Fin Por cada

Hasta que ($t \leq Máximo\_Generaciones$)

Salida: $Mejor\_Solución$.

Pseudo Código 1 Algoritmo AFSA

d) Harmony Search

El funcionamiento de este algoritmo desarrollado no consiste solamente en ofrecer

una obra musical armonizando las mejores notas al mismo tiempo, sino que también toma forma de acuerdo con la interpretación natural de un músico y la idea de implementarla de manera óptima durante la interpretación. De acuerdo a esto, se pueden apreciar tres actividades en particular:

- Tocar cualquier canción popular completamente de memoria, (uso de la memoria armónica).
- Tocar algo parecido a una obra conocida, (ajuste de tonalidad).
- Componer / armonizar notas nuevas o aleatorias, (aleatorización)

Paso 1: Inicialización

- Define la Memoria de Armonía (HM): La HM es como un libro de canciones donde se almacenan las mejores soluciones encontradas hasta el momento. Define el tamaño de la HM (cuántas soluciones quieres guardar) y la cantidad de variables de decisión (notas musicales) que tiene tu problema.
- Genera la HM inicial: Crea soluciones aleatorias dentro del rango de posibilidades de cada variable y almacénalas en la HM.

Paso 2: Improvisación

- Crea una nueva armonía: Genera una nueva solución candidata. Esto se hace considerando tres operadores:
- Reproducción aleatoria (HMCR): Con cierta probabilidad (HMCR), elige aleatoriamente un valor para cada variable dentro de su rango.
- Consideración de la memoria (PAR): Con cierta probabilidad (PAR), elige un valor para cada variable de las soluciones almacenadas en la HM.
- Ajuste de tono (BW): Ajusta ligeramente el valor elegido, ya sea de forma aleatoria o utilizando un paso definido, para explorar soluciones cercanas.

- Evalúa la nueva armonía: Calcula la función objetivo para la nueva solución candidata. La función objetivo mide qué tan buena es una solución.

Paso 3: Actualización de la Memoria de Armonía

- Comparación y selección: Compara la nueva armonía con la peor armonía (la solución con la peor función objetivo) en la HM.
- Reemplazo: Si la nueva armonía es mejor que la peor armonía en la HM, reemplaza la peor armonía con la nueva armonía.

Paso 4: Criterio de parada

- Repite los pasos 2 y 3: Continúa improvisando nuevas armonías y actualizando la HM hasta que se cumpla un criterio de parada.
- Criterios de parada comunes: Número máximo de iteraciones, mejora mínima en la función objetivo, o tiempo de ejecución máximo.
- Al final del proceso, la mejor armonía en la HM será la mejor solución encontrada por el algoritmo.

El procedimiento del algoritmo *HS* se ilustra en el *Pseudo Código No. 2*.

Algoritmo HS

Entrada: Número de Variables (n), parámetros del HS (HMS , $HMCR$, PAR , BW), número máximo de iteraciones (NI), límites superiores (UB_i) e inferiores (LB_i).

Función Objetivo $F(X_i)$, ($i = 1, 2, \dots, n$)

Generar los armónicos iniciales (**Para** $i = 1$ **hasta** HMS)

Evaluar $F(X_i)$

Repetir

Crear un nuevo vector armónico X_{new}

Repetir

Crear un nuevo armónico:

Si ($rand()_1 < HMCR$) **entonces:**

Escoger un valor de HM para i :

$X_{i,new} = HM(a,i)$, $a \in \{1, 2, \dots, HMS\}$

Si ($rand()_2 < PAR$) **entonces:**

Ajustamos el valor de i :

$X_{i,new} = X_{i,new} \pm rand()_3 * BW$

Fin Si

De lo contrario:

Escogemos una variable aleatoria:

$X_{i,new} = LB_i + rand()_4 * (UB_i - LB_i)$

Fin Si

Hasta que ($i \leq n$)

Si $F(X_{new}) \leq F(X_{worst})$ **entonces:**

Incluir X_{new} a HM

Excluir X_{worst} de HM

Fin Si

Hasta que ($t \leq NI$)

Mostrar la mejor Solución.

Pseudo Código 2 Algoritmo HS

e) Caso de estudio

En este trabajo se utilizó un modelo a escala real de una armadura tipo nave industrial compuesta por 161 barras, la cual se muestra en la Fig. 1, donde el objetivo es optimizar las secciones estructurales con el objetivo de minimizar el peso de la estructura. Se aplicaron 2 casos de carga: cargas gravitacionales y cargas por viento de acuerdo a la Norma Técnica Complementaria Sobre Criterios Y Acciones Para El Diseño Estructural De Las Edificaciones (2023) [16] y Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento (2020) [17].

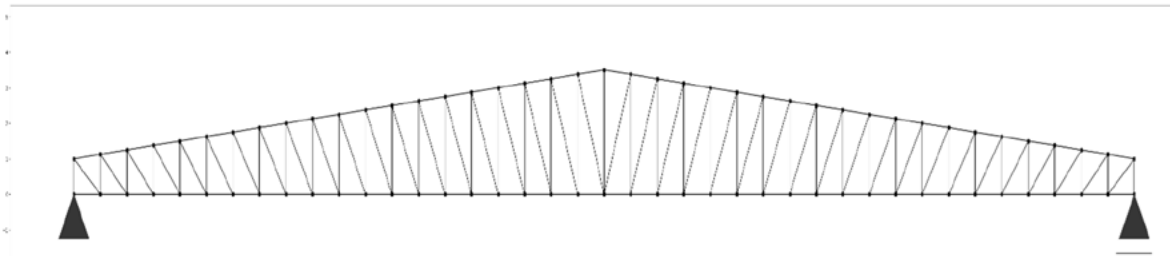


Figura 1 Caso de Estudio, armadura con 161 barras.

Se considero una separación de armaduras de 6.00 m, el peso de la estructura es minimizado con 4 tipos de secciones (variables de diseño):

- Cuerda Superior
- Cuerda Inferior
- Montantes
- Diagonales

Los límites de capacidad ultima a Tensión y Compresión serán calculados para cada sección seleccionada de acuerdo a lo especificado en el ANSI/AISC 360-22 [6].

3. Resultados y discusión

El peso óptimo encontrado por el algoritmo *AFSA* para el caso de cargas gravitacionales es de 3682.892 kg, y para el caso de cargas por viento es de 3635.099 kg, las secciones transversales y sus máximos ratios de capacidad se muestran en la Tabla 1, y en la Tabla 2 se muestra la estructuración final de la armadura con sus respectivas secciones, para la cual se utilizó la envolvente de los casos de carga gravitacionales y por viento, cumpliendo con los requerimientos de seguridad de cada caso, obteniendo un peso total de 3520.127 kg. Para el caso del algoritmo *HS* se obtuvo una solución global con un peso de 3914.778 kg, las secciones las secciones transversales y sus máximos ratios de capacidad se muestran en la Tabla 2.

En las Figuras 2 y 3 se muestra la evolución de la función objetivo mediante el algoritmo *AFSA*, se observa que para el primer caso se logro obtener una solución global hasta la iteración 100, mientras que para el segundo caso se logró desde la iteración 25, esto nos demuestra la funcionalidad del algoritmo de buscar soluciones locales y su habilidad de salir de ellas dependiendo de la dimensión del problema y la cantidad de variables involucradas.

En la Figura 4 se muestra la evolución de la función objetivo mediante el algoritmo *HS*, se

observa una convergencia de la solución global en la iteración 130, Sin embargo, estos valores no son consistentes cuando el algoritmo se vuelve a ejecutar, ya que se pueden obtener valores muy variados por la variable de aleatoriedad en la que se basan los algoritmos, en otras iteraciones se llegaron a valores cercanos a las ocho toneladas, que por más iteraciones que se agregaran, estos no disminuían.

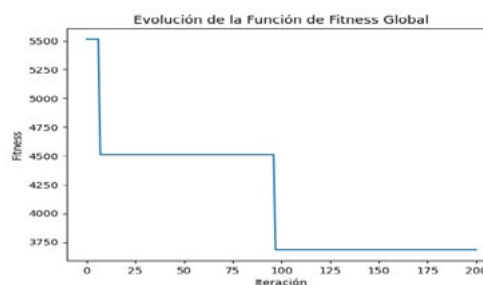


Figura 2 Evolución de la Función Objetivo mediante algoritmo *AFSA* caso cargas gravitacionales.

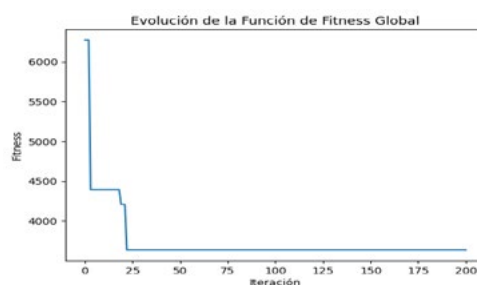


Figura 3 Evolución de la Función Objetivo mediante algoritmo *AFSA* caso cargas por viento.

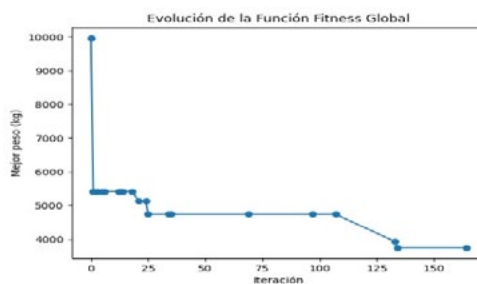


Figura 4 Evolución de la Función Objetivo mediante algoritmo *HS*.

Se observa que el algoritmo *AFSA* se comporta y obtiene una solución global mejor en comparación con el algoritmo *HS*

utilizando el mismo número de iteraciones, además de se observa que en el algoritmo HS se tienen barras que superan el 100% de su capacidad. Con la implementación de estos algoritmos se reduce considerablemente el tiempo invertido en encontrar una solución global y económica que cumpla con los criterios de seguridad actuales comparado con los métodos tradicionales, además de que puede ser adaptado a cualquier tipo, forma y dimensión de armaduras.

a) Análisis Plástico

Además de realizar un análisis elástico de la estructura, se realizó un análisis plástico de la estructuración final para determinar la carga

ultima que puede soportar considerando la plastificación de los elementos estructurales y la redistribución de fuerzas en los demás elementos, en las Figuras 5-6 se muestra la gráfica de Carga - Desplazamiento de los casos de cargas gravitacionales y cargas por viento respectivamente. Se puede observar un factor de amplificación $\lambda = 1.60$ y $\lambda = 1.36$ para el caso de cargas gravitacionales y cargas por viento respectivamente, lo que nos asegura que la estructuración seleccionada es capaz de resistir un poco mas que las cargas aplicadas, logrando estar dentro del margen de la seguridad e integridad estructural.

Tabla 1 Secciones Estructurales determinadas mediante algoritmo AFSA

Elemento	Cargas Gravitacionales				Cargas por Viento			
	Sección	Área (m ²)	Ratio	Peso (kg)	Sección	Área (m ²)	Ratio	Peso (kg)
Cuerda Superior	HSS10X3X1/8	0.00189	0.9368	830.934	HSS6X2X1/4	0.00217	0.7519	945.906
Cuerda Inferior	HSS7X7X1/8	0.00204	0.7873	860.000	HSS8X2X3/16	0.00212	0.9506	890.000
Montantes	HSS8X2X1/8	0.00144	0.2723	1078.110	HSS7X3X1/8	0.00144	0.2363	1078.110
Diagonales	HSS5X2-1/2X1/8	0.00106	0.4983	913.848	HSS3-1/2X2-1/2X1/8	0.000839	0.8443	721.083
				Σ 3682.892				Σ 3635.099

Tabla 2 Estructuración final combinando los dos casos de carga del algoritmo AFSA y HS

Elemento	AFSA			HS		
	Sección	Ratio	Peso (kg)	Sección	Ratio	Peso (kg)
Cuerda Superior	HSS10X3X1/8	0.9368	830.934	HSS6X3X3/8	0.5140	1536.444
Cuerda Inferior	HSS8X2X3/16	0.9495	890.000	HSS12X2X3/16	0.6642	1270.000
Montantes	HSS8X2X1/8	0.2723	1078.110	HSS2-1/2X2-1/2X1/8	1.2838	516.780
Diagonales	HSS3-1/2X2-1/2X1/8	0.9321	721.083	HSS2-1/2X2-1/2X1/8	1.0516	591.554
			Σ 3520.127			Σ 3914.778

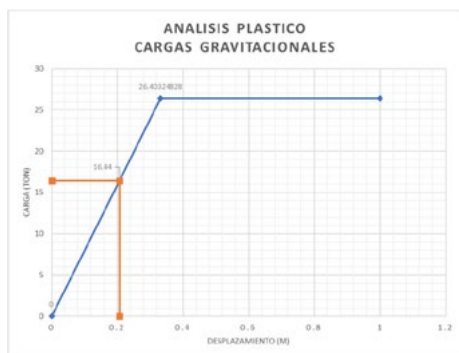


Figura 5 Grafica Carga-Desplazamiento caso Cargas Gravitacionales

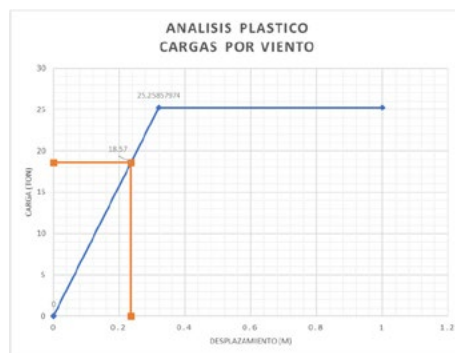


Figura 6 Grafica Carga-Desplazamiento caso Cargas por Viento

4. Conclusiones

Este trabajo presentó la utilización de los algoritmos AFSA y HS como una opción en la optimización estructural, se utilizaron para una armadura tipo nave industrial de gran escala, obteniendo resultados satisfactorios en función del objetivo planteado. Se lograron obtener las secciones mínimas que cumplen con las restricciones estructurales, reduciendo el peso de la estructura y su vez el costo, de una manera rápida y eficiente. Estos algoritmos pueden ser aplicados a diferentes tipos y dimensiones de armaduras, lo que los hace una opción para la optimización de estructuras, sin embargo, para obtener un mejor rendimiento de los algoritmos se podrían realizar ajustes a los parámetros de iniciación y comportamiento de cada algoritmo, como tamaño de la población, número de generaciones y el número de variables independientes, además realizar la combinación de estos con otros métodos de optimización, debido a que gran parte de la eficiencia de los procedimientos radicaba en los valores iniciales, a pesar de ser algoritmos capaces de realizar búsquedas en un universo amplio de soluciones, la concentración de valores en una zona específica determina mucho el resultado final, debido a que puede caer en mínimos locales y no obtener la mejor solución global.

5. Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Querétaro y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

6. Referencias

- [1] L. Mei y Q. Wang, «Structural Optimization in Civil Engineering: A Literature Review,» Buildings, 2021.
- [2] A. Kaveh y M. Khayatizad, «Ray optimization for size and shape optimization of truss structures,» Computers and Structures, 2012.
- [3] I. Delyová, P. Frankovský, J. Bocko, P. Trebuňa, J. Živčák, B. Schürger y S. Janigová, «Sizing and Topology Optimization of Trusses Using Genetic Algorithm,» Materials, 2021.
- [4] T. H. Van, S. Tangaramvong, S. Muong y P. T. Van, «Combined Gaussian Local Search and Enhanced Comprehensive Learning PSO Algorithm for Size and Shape Optimization of Truss Structures,» Buildings, 2022.
- [5] G. Bekdaş, M. Yucel y S. M. Nigdeli, «Evaluation of Metaheuristic-Based Methods for Optimization of Truss Structures via Various Algorithms and Lévy Flight Modification,» Buildings, 2021.
- [6] American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 360-22 Specification for Structural Steel Buildings, 2022.
- [7] T. Dong, S. Chen, H. Huang, C. Han, Z. Dai y Z. Yang, «Large-Scale Truss Topology and Sizing Optimization by an Improved Genetic Algorithm with Multipoint Approximation,» Applied Sciences, 2021.
- [8] N. Nourian, M. El-Badry y M. Jamshidi, «Design Optimization of Truss Structures Using a Graph Neural Network-Based Surrogate Model,» Algorithms, 2023.
- [9] M. Neshat, G. Sepidnam, M. Sargolzaei y A. Najaran Toosi, «Artificial fish swarm algorithm: a survey of the state-of-the-art, hybridization, combinatorial and indicative applications,» Artificial Intelligence Review, 2012.
- [10] H.-C. Tsai y Y.-H. Lin, «Modification of the fish swarm algorithm with particle swarm optimization formulation and communication behavior,» Applied Soft Computing, 2011.
- [11] N. Zainal, A. Mohd Zain y S. Sharif, «Overview of Artificial Fish Swarm Algorithm and Its Applications in Industrial Problems,» Applied Mechanics and Materials, 2015.
- [12] C. Zhang, F.-m. Zhang, F. Li y H.-s. Wu, «Improved Artificial Fish Swarm Algorithm,» de 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2014.
- [13] K. Seok Lee y Z. Woo Geem, «A new structural optimization method based on the harmony search algorithm,» Computers and Structures, 2004.
- [14] G. Chauhan, V. Patel y V. Arekar, «Applications of Harmony Search Algorithm in Structural Engineering,» Kalpa Publications in Civil Engineering, vol. 1, p. 239–247, 2007.
- [15] Z. Woo Geem, «Music-Inspired Harmony Search Algorithm Theory and Applications,» Studies in Computational Intelligence, vol. 191, 2009.
- [16] Gobierno de la Ciudad de México, Norma Técnica Complementaria Sobre Criterios Y Acciones Para El Diseño Estructural De Las Edificaciones, Ciudad de México, 2023.
- [17] Comisión Federal de Electricidad, Manual de Diseño de Obras Civiles, México, 2020.

El valle inquietante aplicado al espacio arquitectónico

The Uncanny Valley Applied to Architectural Space

Villalobos Guzmán Samantha Athenas
López Domínguez Guillermo Iván
Maestría en Arquitectura, Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
samy_athenas@hotmail.com

Palabras clave: ARQ. Espacio liminal, valle inquietante, composición arquitectónica, diseño, familiaridad.

Resumen: Tomando como referencia la teoría del valle inquietante, propuesta por Masahiro Mori en 1970 [1], que establece que la relación entre un diseño y sus similitudes humanas contribuye a que éste sea percibido como perturbador, este artículo busca establecer un paralelo en el campo de arquitectura. La familiaridad del espacio sugiere confianza y afinidad siempre y cuando cumpla con una estructura lógica y ordenada, acompañada por detalles que terminan de estilizar el espacio dando como resultado una composición arquitectónica familiar. Sin embargo, no toda composición genera afinidad, por lo que pueden desviarse de lo común y tornarse incómodas. Al tratarse de un fenómeno que se centra en la percepción que se tiene ante el diseño, este artículo plantea la idea de replicar el modelo de Mori en el ámbito la composición arquitectónica, pero desde la virtualidad. Se ejemplifica a través de cinco paralelismos entre los distintos niveles de afinidad de Mori y el espacio arquitectónico en videojuegos, aportando un referente teórico para medir, respecto a la familiaridad, un espacio arquitectónico tanto en la práctica del diseñador como en el campo investigativo estético.

Keywords: ARCH. Liminal space, uncanny valley, architectural composition, design, familiarity.

Abstract: Taking as reference the theory of the uncanny valley, proposed by Masahiro Mori in 1970 [1], which establishes that the relationship between a design and its human similarities contributes to it being perceived as disturbing, this paper seeks to establish a parallel in the field of architecture. The familiarity of space suggests trust and affinity as long as it complies with a logical and orderly structure, accompanied by details that stylize the space, resulting in a familiar architectural composition. However, not all compositions generate affinity, so they can deviate from the common and become uncomfortable. As it is a phenomenon that focuses on the perception of design, this article raises the idea of replicating Mori's model in the field of architectural composition, but from virtuality. It is exemplified through five parallels between the different levels of affinity of Mori and the architectural space in video games, providing a theoretical reference to measure, with respect to familiarity, an architectural space both in the designer's practice and in the aesthetic research field.

1. Introducción

Este artículo pretende establecer un paralelismo entre los ejemplos de diseño en la robótica mencionados por Masahiro Mori [1] y el diseño espacial arquitectónico virtual, teniendo como criterios las características de diseño encontradas en la gráfica del valle inquietante las cuales oscilan entre lo familiar (causante de afinidad en el usuario) y lo desfasado (causante de repulsión).

El espacio arquitectónico virtual como base de este estudio juega un papel importante ya que según Slater [2] dentro de estos medios, un usuario es capaz de sentir presencia como si se tratase de un espacio arquitectónico real. Además, los escenarios de los títulos de videojuegos utilizados aquí comparten varios rasgos de las características compositivas de diseño encontradas en la teoría de Mori [1], estando ya traducidos a espacios arquitectónicos. Finalmente, pueden ser fácilmente recorridos como ejercicio experiencial, cosa que se insta al lector a experimentar.

El profesor en robótica Masahiro Mori propone una gráfica (Fig. 1) [1] partiendo de la función de crecimiento monótono (Ec.1) que es:

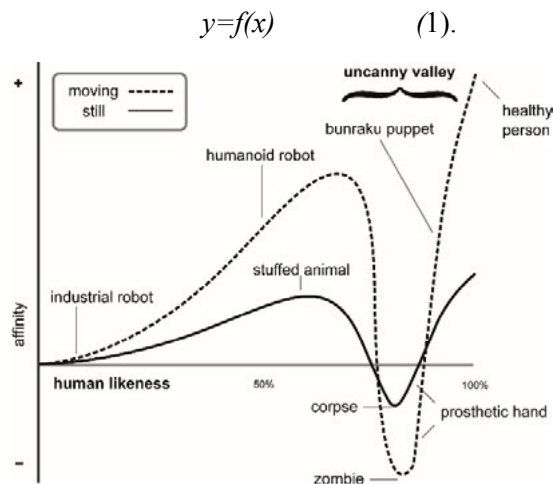


Fig. 1: Gráfica del Valle Inquietante [1].

Esta gráfica describe la teoría del valle inquietante exponiendo dos curvas en las que se encuentran diversos ejemplos de diseños robóticos donde, conforme avanzan en el eje x , su nivel de afinidad sube gracias al aumento de características antropomórficas que contienen. La curva con línea continua referencia diseños estáticos y la que tiene línea discontinua diseños dinámicos.

La primera curva ascendente se rige por la función de crecimiento monótono; aquí, la función x cambia el valor de y . Esta función acompaña gran parte de las acciones-reacciones de muchos eventos en la vida cotidiana, por ejemplo, a mayor fuerza se le imprima al acelerador de un auto, mayor será la velocidad alcanzada, o, a mayor cantidad de pasos de una persona, mayor será la distancia recorrida. Esta función resulta lógica para eventos físicos y muchas veces también para eventos personales prácticos, por ejemplo, entre más tiempo se emplee para estudiar un tema, mayor será la posibilidad de acreditar un examen de dicho tema. Sin embargo, no se puede decir que en este apartado personal (y mucho menos, emocional) esta función sea una regla universal ya que no todos los eventos de la vida tienen estas consecuencias lógicas y, al enfrentarse a eso y no conseguir los resultados esperados, la persona puede experimentar un malestar emocional. Uno de estos casos es notable en el valle de la gráfica donde se observa cómo ambas curvas caen dramáticamente incluso con el continuo aumento de antropomorfización del diseño. Se puede ver que hay diseños que se acercan a lo aparentemente humano pero que generan rechazo, luego las curvas vuelven a subir hasta llegar al humano saludable. Esta caída no tiene una justificación, sin embargo, existen varios estudios, principalmente dentro de la psicología, que tratan de explicarlo.

Dentro de la rama de la robótica se han hecho diversos esfuerzos, uno de ellos es la eficiencia del diseño de máquinas para cumplir con ciertas funciones como es el caso de los brazos

hidráulicos empleados en líneas de ensamblaje de autos, donde el diseño es básico y los movimientos son simples contracciones y torsiones de la cabeza y el ángulo del brazo robótico. Claramente el apartado de diseño se rige por la función, por lo que un brazo hidráulico no tratará de emular una apariencia o comportamiento humano, simplemente suplir la función de una persona en un trabajo. El hecho de que esta máquina no parezca un ser humano resulta en que una persona no sienta afinidad hacia ese objeto.

Por otro lado, un diseñador de figuras puede crear un robot de juguete que cuente con una apariencia más amigable para un niño, un robot con dos brazos, piernas, torso y cabeza que se muevan de forma mecánica y camine. Este objeto producirá mayor afinidad gracias a un diseño más cercano a la apariencia y comportamiento humano.

En ambos ejemplos se pueden observar las consecuencias lógicas de la función de crecimiento monótono: a mayor apariencia humana, mayor será la afinidad por parte de quien presencia dicho objeto.

En cambio, otro objetivo de la robótica ha sido la creación de un ser humano artificial el cual luzca y se mueva como un humano real. Un ejemplo cercano a esto es el diseño de prótesis modernas que recrean la textura de la piel, uñas, vellos y hasta huellas dactilares, las cuales generan un nivel de afinidad alto hasta que se tiene contacto con ellas y se puede sentir la ausencia de estructuras óseas, temperatura cálida y tonos de piel realistas. Al notar estas diferencias una persona puede sentirse sobresaltada. Entonces se dice que, la apariencia de la prótesis es bastante cercana a un miembro humano, sin embargo, genera un valor negativo de afinidad, es decir repulsión. La función de crecimiento monótono no se cumple aquí. Este ejemplo representa la teoría de valle inquietante en una de las posiciones más bajas de la gráfica, encontrándose del otro lado la posición más alta que refiere a un ser

humano común con movimientos, apariencia y comportamiento reales.

El factor de movimiento es igualmente crucial para la sensación de afinidad y repulsión respecto a un objeto ampliando las curvas de la gráfica. Se espera que un brazo hidráulico tenga movimientos mecánicos consecutivos y, que un ser humano tenga movimientos naturales aleatorios, sin embargo, al encontrarse con un objeto cerca al fondo del valle que además tiene movimiento, la inquietud y repulsión se intensifica. Una mano protésica por sí misma genera inquietud al interactuar con ella, pero con movimiento, la inquietud crece, más aún tratándose de un robot de cuerpo completo moviéndose (similar a un zombi) [1].

Los estudiantes de psicología Alexander Diel y Michael Lewis publicaron un artículo [3] donde estudiaron y midieron a través de experimentos las emociones relacionadas a la inquietud y el miedo relacionadas con desviaciones estructurales en diversos espacios arquitectónicos. Concluyen entonces que estas sensaciones que están relacionadas a lo siniestro son reacciones a desviaciones de patrones familiares, lo que se espera de una composición arquitectónica típica en contraste con una composición atípica, un quiebre a la familiaridad, entendiendo familiaridad como una serie de eventos y elementos lógicos bajo un orden al cual se está acostumbrado a vivir y forma la visión de la realidad; en el sentido espacial es una serie de elementos arquitectónicos compuestos de forma lógica y funcional, típica a cualquier tipo de edificación conocida y con la que se tenga cierto acercamiento.

Diel y Lewis [3] defienden la idea de que la teoría del valle inquietante a nivel emocional no únicamente se refleja en la rama de la robótica sino también en el espacio construido, sin embargo y en consecuencia al campo al que ellos pertenecen, no se ahonda del todo en

el apartado del diseño espacial el cual le compete a la arquitectura.

Este artículo replicará el modelo del valle inquietante de Mori [1] en sentido espacial, proponiendo paralelismos de espacios arquitectónicos virtuales, como sustitutos de los ejemplos de robótica originales ordenados conforme su familiaridad indagando en su composición arquitectónica. Este nuevo modelo ayudará a evidenciar los niveles de familiaridad y afinidad espacial del diseño arquitectónico desde su composición.

2. Metodología.

Primeramente, Mori [1] hace una distinción dentro de su gráfica entre objetos con movimiento y sin movimiento. Por la naturaleza estática de las edificaciones, únicamente se tomarán los ejemplos de la gráfica que no contengan movimiento a excepción del “robot industrial” como expresión mínima de un espacio familiar y del

“humano saludable” como expresión máxima de un espacio familiar.

Se tomarán imágenes representativas de espacios virtuales de diversos títulos de videojuegos para la conformación de los paralelismos ya que el espacio virtual es un entorno condensado y aislado el cual no se encuentra contaminado por factores externos que puedan alterar los resultados de esta investigación, la cual se enfocará en la composición arquitectónica.

Se rescatan entonces cinco nodos principales de la teoría del valle inquietante y se proponen cinco títulos de videojuego que pretenden fungir como paralelismos espaciales, ambos compartiendo las siguientes características generales de diseño (Tabla 1).

Tabla 1: Características generales de diseño de las categorías principales del valle inquietante y paralelismos propuestos [elaboración propia].

Nodos de la gráfica del valle inquietante	Características principales	Paralelismo espacial o arquitectónico
Robot industrial	Mínimo de elementos necesarios para el desarrollo de una actividad común.	NaissanceE, 2014.
Animal de peluche	Emulación de la realidad sin realismo con resultados caricaturescos.	Superliminal, 2020.
Cadáver	Emulación de la realidad, pero con resultados altamente artificiales. Genera rechazo total.	Anemoiapolis: Chapter 1, 2023.
Mano protésica	Emulación de la realidad con alto detalle y una imagen cuidada menos artificial.	The Stanley Parable: Ultra Deluxe, 2022.
Persona saludable	Realismo y familiaridad completa. Refleja la realidad de una persona.	Visage: Rakan's Chapter, 2020.

3. Resultados.

A. Paralelismo #1: Robot Industrial.

La característica principal del robot industrial que describe Mori es esencialmente un diseño que se rige bajo una estructura de funcionalidad, descartando cualquier elemento

estético y emocional ya que la premisa de su diseño es que únicamente resulte eficiente respecto a la utilidad que desempeña. Se puede decir entonces que se trata de lo mínimo requerido para que se considere útil.

En ese sentido, su equivalencia espacial está compuesto solamente por volúmenes y juego

de luces y sombras en donde se puedan desempeñar actividades cotidianas. El mejor ejemplo para esta tipología se encuentra en el título *NaissanceE*, que refleja una arquitectura brutalista sustentada en macizos y vanos cubiertos por una luz neutra carente de colores y texturas (Fig. 2) [4].

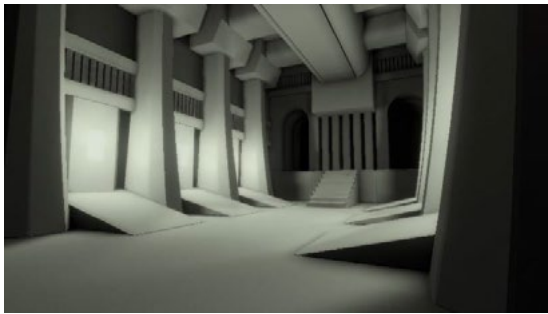


Fig. 2: Fotograma del videojuego “NaissanceE” [4].

B. *Paralelismo #2: Animal de Peluche.*

Esta categoría se caracteriza por un diseño con intenciones más cercanas a la familiaridad. Resulta agradable, coqueto y divertido ya que sus elementos pretenden añadirle características más apegadas a la realidad como colores, texturas y una configuración simple como ocurre con muchos diseños de juguetes. En la explicación del valle inquietante, Mori [1] pone un ejemplo sobre un robot de juguete el cual se aleja de lo que sería un robot funcional y se acerca a una imagen más amigable y estilizada.

Una de las mejores representaciones espaciales de esto son los espacios vistos en el título *Superliminal*. Los espacios aquí encontrados cuentan con una configuración apegada a la una real utilizando colores, luces y texturas propias de ciertos materiales, además de incluir muebles y hasta detalles menores con un sentido lógico de su acomodo, pero conservando una imagen caricaturizada de un espacio real (Fig. 3) [5].



Fig. 3: Fotograma del videojuego “Superliminal” [5].

C. *Paralelismo #3: Cadáver.*

Es la categoría más baja en la gráfica de Mori, y en tanto, la más importante donde se representa fielmente su teoría. Se retrata un cuerpo con visual humana sin vida y, por lo tanto, sin movimiento. Una representación visual fiel del cuerpo humano, pero sin alma.

Su paralelismo arquitectónico es un espacio que contiene muebles, texturas, colores, etc. Elementos que reflejan fielmente objetos y composiciones lógicas de un espacio real correctamente pero que genera una sensación de “simulación”, un espacio escenográfico en donde se pueden realizar actividades cotidianas pero que da una sensación de desconcierto, descolocación e inquietud.

El escritor de obras de terror Stephen King describe este fenómeno como:

“una penetrante sensación de inestabilidad... de que hay cosas que están fuera de su sitio” [6].

Más aún, en palabras de Sigmund Freud se explica esta sensación como:

“[...] lo siniestro sería aquella suerte de espantoso que afecta las cosas conocidas y familiares desde tiempo atrás. En lo que sigue se verá cómo ello es posible y bajo qué condiciones las cosas familiares pueden tornarse siniestras, espantosas. [...] algo en que uno se encuentra, por así decirlo, desconcertado, perdido. Cuanto más orientado esté un hombre en el mundo, tanto menos fácilmente las

cosas y sucesos de éste le producirán la impresión de lo siniestro” [7].

La mejor representación de este tipo de espacios se refleja en la arquitectura del título de videojuego *Anemoiapolis: Chapter 1*, donde se pueden observar espacios que funcionan de manera lógica y tienen sentido, pero, a diferencia del apartado anterior, su configuración parece montada, no habitada ni utilizada. Permanece como un espacio expositivo y maquettato que da a entender el funcionamiento de dicho espacio, pero no ahonda en una apropiación de un espacio real. (Fig. 4) [8].

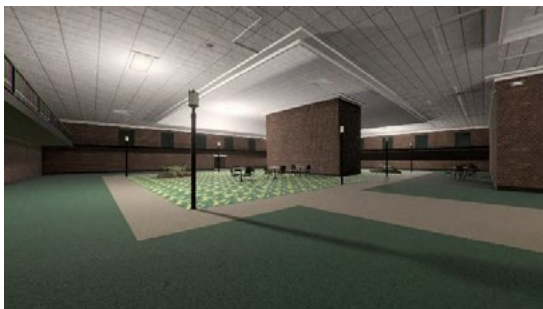


Fig. 4: Fotograma del videojuego “Anemoiapolis: Chapter 1” [8].

D. Paralelismo #4: Mano protésica.

La mano protésica representa una imagen altamente realista respecto a cómo lucen sus materiales, luces y cómo conserva un lenguaje arquitectónico lógico basado en la realidad. Se considera como un diseño sumamente cuidado y pulcro, alejado de la caricaturización y habiendo sobrepasado la imagen simulada de la categoría anterior, aumentando su nivel de realismo, familiaridad y generando nuevamente una sensación de afinidad, marcando aquí la reorientación de la gráfica hacia lo familiar.

El paralelismo propuesto para esta categoría son los espacios encontrados en el título *The Stanley Parable: Ultra Deluxe* donde se pueden encontrar escenarios diseñados para aparentar secciones de oficinas y algunas áreas de exposición con materiales que rozan el

realismo completo, iluminación muy cercana a la natural y pulcritud en el acomodo de sus objetos y mobiliario (Fig. 5) [9].



Fig. 5: Fotograma del videojuego “The Stanley Parable: Ultra Deluxe” [9].

E. Paralelismo #5: Persona Saludable.

Finalmente, esta categoría Mori la ejemplifica con la figura de un ser humano real saludable, una persona con todas sus extremidades y sin ninguna condición médica que afecte su apariencia física ni motriz, siendo totalmente funcional y emocionalmente afín y familiar a otro ser humano común.

Esta es la posición final de la gráfica de Mori en donde encontramos un espacio que refleja totalmente la familiaridad por medio de sus elementos, familiaridad que refleja el estado cotidiano de las actividades de un usuario común y que traza la visión de la realidad de una persona.

El espacio propuesto es una habitación vista en el título de videojuego *Visage: Rakans Chapter*. Una de las grandes evidencias de esto es que se pueden observar elementos como ropa y muebles que han sido utilizados, además de una configuración arquitectónica lógica que seguir. Pasa completamente como un espacio cotidiano que es utilizado por una persona real en su día a día, moviendo objetos de lugar, durmiendo en su cama y transitando por el espacio. Una escena básica de la cotidianidad de una persona (Fig. 6) [10].



Fig. 6: Fotograma del videojuego “Visage: Rakan’s Chapter” [10].

3. Discusión

Cuando se habla de respuestas emocionales es sumamente difícil cuantificar los resultados, sin embargo, el poder visualizar los paralelismos anteriores ayuda a dar a entender los niveles de afinidad del diseño presentes dentro de la teoría de Mori [1], sobre todo refiriéndose a su apartado más icónico que es la parte más baja de su gráfica y, más importante aún, se evidencia que el diseño arquitectónico y la inquietud no son conceptos ajenos dentro del diseño.

Dentro del folklore de internet y de forma coloquial, los espacios arquitectónicos encontrados dentro de este bajo espectro son conocidos como “espacios liminales”, espacios que, a grandes rasgos, son caracterizados por generar mayoritariamente una sensación de inquietud en el usuario o en quien presencia dicho espacio. Es tan grande este concepto estético que incluso existen foros especializados donde miles de personas discuten respecto a sus propias sensaciones, siendo el más prolífero a la fecha (segunda mitad de 2024) y el más antiguo (creado en 2019) el foro de Reddit *r/LiminalSpace*, con más de 791,000 usuarios activos donde se comparten imágenes, likes y comentarios afines a espacios arquitectónicos que caen cerca del fondo de la gráfica del valle inquietante, dando por resultado muchos comentarios coincidentes emocionalmente [11].

Es importante acentuar que no se pretende emitir ningún juicio respecto a la calidad emocional o moralidad sobre utilizar configuraciones similares a las vistas en este artículo en la práctica arquitectónica, y se es consciente que estos diseños causantes de inquietud han resultado atractivos siendo muy utilizados en los últimos años en el diseño de videojuegos y diversas expresiones estéticas con el propósito de generar miedo e inquietud de forma recreativa y artística, cosa que, a juicio personal, es maravilloso.

4. Conclusiones

El espacio desfamiliarizado ha sido objeto de estudio tanto de la psicología, el arte y ahora de la arquitectura. Se considera que muchos de estos espacios efectivamente comparten características de diseño con los ejemplos dados por Mori [1] y, por lo tanto, se puede decir que la teoría del valle inquietante no es exclusiva del área de la robótica, sino que le compete también a la rama de la arquitectura y posiblemente a otras áreas del diseño.

Es importante recordar que el diseño, a diferencia de la naturaleza, es regida por el hombre y estetizada a favor de lo que se desea, por lo que este tipo de espacios fueron pensados, planeados y proyectados para uso humano. Resulta curioso que muchos de ellos, a pesar de tener ese trasfondo de diseño, caigan en un espectro emocional no precisamente favorable en la realidad.

Los paralelismos espaciales basados en el modelo de Mori [1] y descritos en el presente artículo pretenden ser un aporte teórico para valorar, respecto a la familiaridad y afinidad, un espacio arquitectónico tanto en la práctica del diseñador como en el campo investigativo ya que se describen puntualmente las características más destacables de estos tipos de composición.

Igualmente se invita a futuras investigaciones estéticas y compositivas indagar si, al igual

que en la robótica y en la arquitectura, en otras ramas del diseño pueden surgir composiciones paralelas.

Agradecimientos

Primeramente, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por las oportunidades y recursos otorgados que siempre impulsan la investigación y la divulgación de temas científicos y humanísticos. A hombros de gigantes.

También a todos los amantes de los temas poco comunes que inspiran, enriquecen y desafían las convenciones académicas abriendo camino al conocimiento en lugares que pocos ven.

Referencias

- [1] M. Mori, "The Uncanny Valley", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no.2, junio, pp. 98-100. 2012.
- [2] M. Slater, et. al., "How we experience immersive virtual environments: the concept of presence and its measurement", *Anuario de Psicología*, vol. 40, no. 2, septiembre, pp. 193-210. 2009.
- [3] A. Diel, M. Lewis, "Structural deviations drive an uncanny valley of physical places", *Journal of Environmental Psychology*, vol. 82, agosto, pp. 1-17. 2022.
- [4] Limasse Five, NaissanceE. [Steam]. Limasse Five, 2014.
- [5] Pillow Castle, Superliminal. [Steam]. Pillow Castle, 2020.
- [6] S. King, *Danza Macabra*, Madrid: Valdemar, 2016.
- [7] S. Freud, *Lo Sinistro*, Madrid: Archivos Vola, 2020.
- [8] Andrew Quist, *Anemoiapolis: Chapter one*. [Steam]. Andrew Quist, 2023.
- [9] Crows Crows Crows, *The Stanley Parable: Ultra Deluxe*. [Steam] Crows Crows Crows, 2022.
- [10] SadSquare Studio, *Visage*. [Steam] SadSquare Studio, 2020.
- [11] Anónimo, "r/LiminalSpace", 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.reddit.com/r/LiminalSpace/> [Acceso: 24/09/2024].

Variación de contenido asfáltico en mezcla asfáltica con la incorporación de mineral carbonatado de Colombia

Variation of asphalt content in asphalt mixture with the incorporation of carbonate mineral from Colombia.

¹Torres González, Susana; ¹López Lara, Teresa; ¹Montoya Zamora, Ricardo; ¹Horta Rangel, Jaime Moisés; ¹Zaragoza Hernández, Juan Bosco; ²Restrepo Vásquez, Gloria María; ²Castro Escudero, Jorge Armando.

¹*División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería.*

¹*Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México*

²*Grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados (PFA)*

²*Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia*

*storres30@alumnos.uaq.mx, lolte@uaq.mx, ricardo.montoya@uaq.mx, horta@uaq.mx,
bosco@uaq.mx, gloria.restrepo1@udea.edu.co, armando.castro@udea.edu.co*

Palabras clave: VTM, mineral carbonatado, mezclas asfálticas, cemento asfáltico.

Resumen- La producción de mezclas asfálticas consume grandes volúmenes de agregados pétreos naturales, lo que impacta negativamente al medio ambiente. Por ello, se buscan alternativas que permitan sustituir parcialmente estos agregados con materiales, como los minerales carbonatados, que mejoran la eficiencia y sostenibilidad al optimizar las propiedades mecánicas y la durabilidad de las mezclas asfálticas, prolongando así la vida útil de las infraestructuras viales.

Este artículo presenta una investigación realizada en Colombia para evaluar la variación en la demanda de cemento asfáltico de mezclas asfálticas que fueron fabricados con una sustitución parcial de agregado pétreo virgen por un mineral carbonatado. Los resultados indicaron que la mezcla con 10% de calcita requería más cemento asfáltico respecto a la mezcla que no contenía calcita.

Keywords: VTM, carbonated mineral, asphalt mixtures, asphalt.

Abstract- The production of asphalt mixtures consumes large volumes of natural stone aggregates, which negatively impacts the environment. Therefore, alternatives are sought to partially replace these aggregates with materials such as carbonated minerals, which improve efficiency and sustainability by optimizing mechanical properties and durability of asphalt mixtures, thus prolonging the useful life of road infrastructures.

This article presents a research carried out in Colombia to evaluate the variation in the demand for asphalt cement, of asphalt mixtures that were manufactured with a partial substitution of virgin stone aggregate with a carbonate mineral. The results indicated that the mixture with 10% calcite required more asphalt cement compared to the mixture that did not contain calcite.

1 Introducción

La incorporación de nuevos materiales en la construcción de pavimentos se ha vuelto un desafío, ya que es difícil encontrar opciones que cumplan con los estándares de calidad. Los altos costos de acarreo y las emisiones de gases de efecto invernadero subrayan la necesidad de métodos innovadores de diseño y construcción. En este contexto, Modupe, *et al*, [1] encontraron que el uso de carbonato de calcio (CaCO_3) en mezclas asfálticas como filler (partículas menores a 0.075 mm) mejora las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas y por lo tanto aumenta su vida útil. Al ser un material económico y amigable con el medio ambiente, se sugiere su uso como sustituto parcial del agregado pétreo en las mezclas asfálticas, promoviendo así pavimentos más sostenibles y eficientes.

En este sentido, se evaluó el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente que fueron fabricadas con la sustitución parcial del agregado pétreo virgen por un mineral carbonatado, disponible en Colombia, con tamaño nominal de 4.75 mm (No. 4) con el objetivo de evaluar la variación del contenido de cemento asfáltico para establecer la alternativa del uso de los minerales carbonatados con tamaños mayores a 0.075 mm como sustitutos de los agregados pétreos vírgenes sin comprometer su resistencia.

Para tales fines se realizaron dos diseños de mezcla asfáltica en caliente; la mezcla base que no contenía carbonato y una mezcla con el 10% de carbonato. El diseño volumétrico se realizó con base al manual de diseño Superpave [2]. Para cada diseño se fabricaron quince probetas con cinco contenidos de asfalto diferentes (tres probetas por contenido) variando en 0.5% cada contenido de asfalto, fueron compactadas con martillo Marshall a 75 golpes por cara. Para cada probeta fue determinado su espesor, así como su densidad

específica bruta (Gmb). Para determinar las propiedades volumétricas de las mezclas se realizaron dos mezclas por diseño para determinar la gravedad específica teórica máxima (Gmm).

En este artículo se presentan las propuestas granulométricas empleadas para cada diseño, las propiedades volumétricas obtenidas para cada diseño, las gráficas de las propiedades volumétricas respecto a la variación en los contenidos de asfalto, así como las conclusiones obtenidas de acuerdo con el comportamiento de las mezclas con sustitución parcial del agregado pétreo.

2 Metodología

A. Mineral Carbonatado

Dentro de la investigación realizada se consideró importante clasificar el tipo de mineral carbonado que se utilizaría en el desarrollo de esta. La clasificación se realizó en el grupo de Catalizadores y Adsorbentes en la Universidad de Antioquia, quienes utilizaron la técnica de Difracción de Rayos X (DRX) para identificar la estructura del mineral carbonatado y Fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar la composición elemental, con los resultados obtenidos concluyeron que el mineral carbonatado corresponde a una calcita.

B. Diseños de mezcla asfáltica

Una vez determinado el tipo de mineral carbonatado que se estaba utilizando, se inició el proceso de elaboración de las mezclas asfálticas con la sustitución parcial del agregado pétreo por la calcita.

Los materiales que estaban disponibles en la Planta Pavimentar Copacabana, Colombia., y que fueron proporcionados para la elaboración de las mezclas asfálticas son los siguientes:

1. Arena triturada No. 4
2. Arena Procesada No. 4

3. Grava 3/4"
4. Mineral carbonatado (Calcita) No. 4
5. Cemento asfáltico Tipo III

Inicialmente se realizó el secado, reducción y determinación de las granulometrías de los agregados pétreos y de la calcita para hacer la combinación teórica de los mismos.

La composición granulométrica de cada material se obtuvo bajo la normativa ASTM 136-06 [3] y los resultados se muestran en la Tabla 2.1 y Fig. 2.1

Tabla 2.1 Composición granulométrica de los agregados pétreos y del mineral carbonatado.

Tamiz		% Pasa			
Abertura (mm)	Designación	Grava 3/4"	Arena Triturada	Arena Procesada	Calcita
37.5	1 1/2"	100	100	100	100
25	1"	100	100	100	100
19	3/4"	99	100	100	100
12.5	1/2"	58	100	100	100
9.6	3/8"	45	96	100	99
4.75	No. 4	15	54	100	65
2.36	No. 8	4	32	88	43
1.18	No. 16	3	20	70	28
0.6	No. 30	2	15	49	20
0.3	No. 50	2	12	29	15
0.15	No. 100	1	8	10	11
0.075	No. 200	0.7	6.0	3.8	7.8

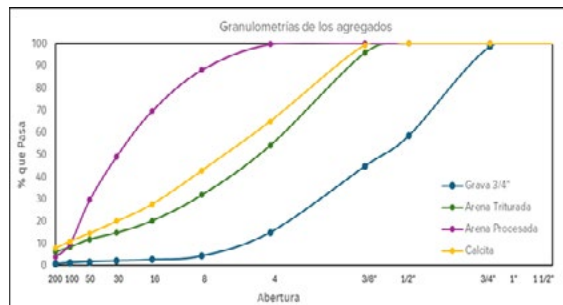


Figura 2.1 Representación gráfica de la Composición granulométrica de los agregados pétreos y del mineral carbonatado.

De acuerdo con el manual de diseño Superpave [2], una vez determinadas las granulometrías individuales de los materiales se realizaron las combinaciones teóricas para realizar una mezcla con tamaño nominal de 3/4", siguiendo los parámetros de control establecidos en el manual de diseño.

Las combinaciones propuestas para cada diseño se muestran en la Tabla 2.2 así como

sus respectivas gráficas de distribución granulométrica en la Fig. 2.2. La mezcla base que no contenía calcita se identificó como M0 mientras que la mezcla con 10% de calcita se identificó como M1.

Tabla 2.2 Propuestas granulométricas para diseños

Tamiz		% que pasa		Puntos de control	
Abertura (mm)	Designación	M0	M1	TN 19.0 mm	
37.5	1 1/2"	100	100		
25	1"	100	100	100	100
19	3/4"	99	99	90	100
12.5	1/2"	83	83		90
9.6	3/8"	76	76		
4.75	No. 4	47	46		
2.36	No. 8	32	30	23	49
1.18	No. 16	23	21		
0.6	No. 30	16	15		
0.3	No. 50	11	11		
0.15	No. 100	6	6		
0.075	No. 200	3.5	3.8	2	8

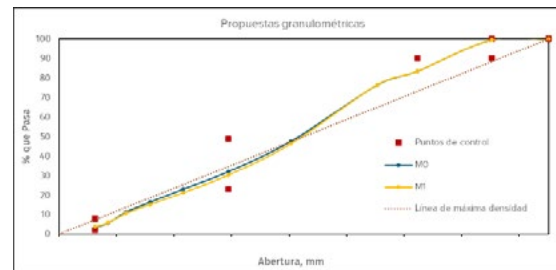


Figura 2.2 Propuestas granulométricas para diseños

Por cada diseño de mezcla asfáltica se elaboraron quince pastillas con cinco contenidos de cemento asfáltico diferentes, realizando 3 pastillas por cada contenido de asfalto de acuerdo con la norma ASTM D6927-15 [4], así mismo, se elaboraron dos mezclas para determinar la densidad específica teórica máxima (Gmm).

El cemento asfáltico utilizado es un asfalto modificado Tipo III de acuerdo con la normativa colombiana INV. Art. 414-13[5]. Las temperaturas de mezclado y compactación son las indicadas en el certificado de calidad por parte del proveedor, quedando de la siguiente manera: temperatura de mezclado 160°C y temperatura de compactación 146°C.

Se dosificaron los agregados pétreos por medio de masas de tal forma que cada retenido en cada tamiz por cada fracción,

comprendieran el 100% de la masa de los sólidos en la mezcla asfáltica. Los agregados y el cemento asfáltico se dejaron calentando en el horno a la temperatura de mezclado al menos 12 horas para asegurar que la temperatura fuera homogénea en todo el material.

Se mezclaron los materiales con el cemento asfáltico correspondiente para cada contenido de asfalto iniciando con 4% e incrementando de 0.5% para evaluar 5 contenidos, es decir, 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%.

Una vez elaboradas las mezclas asfálticas se dejaron 2 horas en el horno a la temperatura de compactación para permitir que el cemento asfáltico sea absorbido adecuadamente por el agregado pétreo y la calcita. Transcurridas las 2 horas se procedió a realizar la compactación de las probetas. La compactación se hizo en un martillo Marshall semiautomático, aplicando 75 golpes por cara para cada probeta, posteriormente se desmoldaron las probetas con ayuda de un gato hidráulico y se dejaron enfriar hasta llegar a temperatura ambiente (para asegurar esto se ensayaron al día siguiente de su fabricación).

Cuando las probetas llegaron a temperatura ambiente, se determinó el espesor de cada probeta, después su densidad específica bruta de acuerdo con la normativa ASTM D2726-13 [6]. Para realizar el análisis volumétrico de los diseños se determinó la densidad específica teórica máxima (Gmm) para cada diseño de mezcla, realizando los ensayos por duplicado de acuerdo con la normativa ASTM D2041-11 [7].

3 Resultados y discusión

A. Mineral Carbonatado

Los resultados de la caracterización del mineral carbonatado realizado en el grupo Catalizadores y Adsorbentes de la Universidad de Antioquia se presentan a manera de resumen en la Tabla 3.3 donde se muestra la composición elemental y en la Tabla 3.4. donde se muestra la estructura mineral y clasificación del mineral carbonatado. El informe con la metodología empleada para los ensayos mencionados anteriormente se puede descargar en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/file/d/1VNvOHgNfi6rVADeZW6zFRcplCnEZ5ZNv/view?usp=drive_link

Tabla 3.3 Resultados de ensayo FRX

Nombre	Compuesto	Composición (%) w/w
Sílice	SiO ₂	2,04
Aluminio	Al ₂ O ₃	0,85
Hierro	Fe ₂ O ₃	0,35
Magnesio	MgO	0,54
Calcio	CaO	65,33
Potasio	K ₂ O	0,05
Fósforo	P ₂ O ₅	0,07
Azufre	SO ₃	0,03
Estroncio	SrO	0,03
Pérdidas por calcinación	L.O.I.	30,7

Tabla 3.4 Resultados de ensayo DRX.

Código	Score	Nombre	Composición (%)	Fórmula Química
98-010-9469	53	Rutile	---	TiO ₂
98-002-7745	13	Quartz	low	SiO ₂
98-015-8258	45	Calcite	73.7	CaCO ₃
		Material amorfo	24.2	---

Estos resultados indican que, de acuerdo con su composición y estructura, el mineral carbonatado analizado es una calcita.

B. Diseños de mezcla asfáltica

Referente a los diseños de la mezcla asfáltica con la sustitución parcial de agregados pétreos vírgenes por calcita. En la Tabla 3.5 se muestran los resultados promedios de Gmb, Gmm y % de vacíos de aire de la mezcla M0, mientras que en Tabla 3.6 se muestran los

resultados promedio de Gmb, Gmm y % de vacíos de aire de la mezcla M1.

Para el cálculo de Va se empleó la Ec. (1).

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (1)$$

Donde:

Va = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla de pavimentación

Gmb = gravedad específica aparente de la mezcla compactada

Tabla 3.5 Resultados promedio de Gmb, Gmm y % Va para la mezcla M0.

% de cemento asfáltico		Gmb	Gmm	Vacios de aire %
respecto a la mezcla	respecto al agregado			
3.85	4.00	2.361	2.617	9.79
4.31	4.50	2.392	2.598	7.93
4.76	5.00	2.409	2.579	6.58
5.21	5.50	2.433	2.560	4.99
5.66	6.00	2.452	2.542	3.54

Tabla 3.6 Resultados promedio de Gmb, Gmm y % Va para la mezcla M1.

% de cemento asfáltico		Gmb	Gmm	Vacios de aire %
respecto a la mezcla	respecto al agregado			
3.85	4.00	2.353	2.640	10.86
4.31	4.50	2.387	2.620	8.91
4.76	5.00	2.400	2.601	7.72
5.21	5.50	2.432	2.582	5.81
5.66	6.00	2.462	2.564	3.94

En la Fig. 3.1 se muestra la gráfica del comportamiento promedio del % de Vacíos de aire (Va) respecto a la variación del contenido asfáltico (Pb), respectivamente, para la mezcla M0.

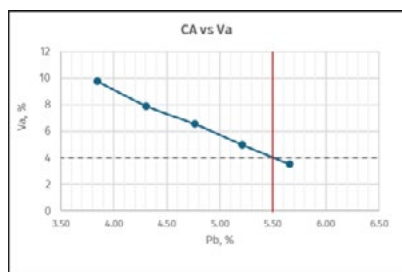


Figura 3.1 Porcentaje de Vacíos de aire promedio vs contenido de asfalto de mezcla sin calcita (M0).

En la Fig. 3.2 se muestra la variación del % de Va respecto a la variación del Pb, respectivamente, para la mezcla M1.

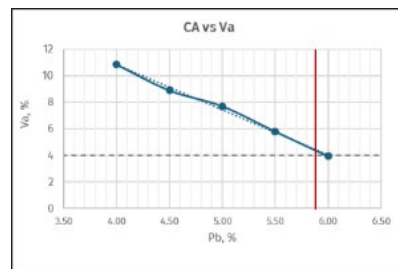


Figura 3.2 Porcentaje de Vacíos de aire vs contenido de asfalto de mezcla con 10% de calcita (M1).

De acuerdo con la metodología de diseño Superpave para el diseño volumétrico, el contenido óptimo para cada diseño es aquel con el que se alcanza 4% de vacíos de aire en la mezcla. En este sentido, en la Tabla 3.7 se presenta el resultado de contenido óptimo para cada diseño.

Tabla 3.7 Resumen de contenido óptimo para cada mezcla.

Diseño	M0	M1	Especificación Superpave [2]
Pb óptimo, %	5.52	5.88	-
Gmb	2.45	2.453	-
Gmm	2.548	2.555	-
Va, %	4.0	4.0	4 %

4 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se observó que la mezcla sin calcita presenta un contenido óptimo de asfalto de 5.52%, mientras que la mezcla con 10% de calcita muestra un ligero incremento quedando en 5.88% (de acuerdo con el criterio de la metodología Superpave empleada para el diseño de las mezclas al cumplir con 4% de vacíos de aire).

El incremento en la demanda de cemento asfálticos sugiere que la adición de calcita afecta negativamente la cantidad de asfalto necesario para lograr obtener propiedades que cumplan con los requerimientos.

Por lo que se recomienda realizar nuevas investigaciones donde se empleen otros porcentajes de sustitución de agregado pétreo virgen por el mineral carbonatado, así como realizar ensayos de laboratorio para evaluar su desempeño mecánico y la adherencia de la mezcla (afinidad agregado pétreo, mineral carbonatado y cemento asfáltico), de tal forma que se pueda considerar el uso de calcita aun cuando la demanda del cemento asfáltico aumenta.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por los recursos otorgados.

Así como al grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados (PFA) de la universidad de Antioquia.

A Anahí Santiago, por el apoyo en la realización de ensayos de laboratorio que forman parte de esta investigación.

A Planta de Asfaltos Pavimentar Copacabana por aportar su conocimiento, recurso humano

y recurso material para el desarrollo de la investigación.

Referencias

- [1] Modupe, A., Aladegboye, D., Alejlowo, E., Orogade, B., Akade, G., y Akinmolayan, O. (2021) Performance evaluation of asphalt concrete mixture incorporating calcite powder as filler substitute for sustainable pavement construction. *Materials Science and Engineering*, 1036 (1), 012034.
- [2] Federal Highway Administration FHA (s.f.) *Superpave Fundamentals*. Reference Manual, NHI Course #131053. U.S. Department of Transportation.
- [3] ASTM Internacional (2006). ASTM D136-06 *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*.
- [4] ASTM Internacional (2015). ASTM D6927-15 *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*.
- [5] Instituto Nacional de Vías (2012) INV ART. 414-13. *Suministros de cemento asfáltico modificado con polímeros*. Especificaciones Generales de construcción de Carreteras. Capítulo 4. Pavimentos Asfálticos. Colombia.
- [6] ASTM Internacional (2013). ASTM D2726-13 *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures*.
- [7] ASTM Internacional (2019). ASTM D2041-19a *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*.

Sueños y realidades. Contradicciones entre la publicidad y la construcción de residenciales en el Bajío

Dreams and Realities: Contradictions Between Advertising and Residential Construction in the Bajío

Béjar González Verónica
*Maestría en arquitectura, Facultad de ingeniería.
Universidad Autónoma de Querétaro.
Querétaro, México.
vbejar23@alumnos.uaq.mx*

Palabras clave: Arquitectura, Desarrollo inmobiliario habitacional, mercadotecnia, estilos de vida, estatus social, amenidades.

Resumen-

La comparación entre las promesas publicitarias y los elementos construidos de los desarrollos inmobiliarios habitacionales en México busca revelar discrepancias para identificar si la publicidad se alinea adecuadamente con lo que ofrece. Este artículo se enfoca en proponer una metodología de análisis comparativo entre la imagen publicitaria y las características reales de lo construido tomando como caso de estudio el Bajío mexicano. Se busca que los resultados de esta metodología permitan, en estudios posteriores, contrastar la percepción y experimentación de los habitantes de estos desarrollos inmobiliarios habitacionales con la oferta de mercado inmobiliario actual.

Keywords: Architecture, Residential real estate development, Marketing, Lifestyles, Social Status, Amenities.

Abstract-

The comparison between advertising promises and the built elements of residential developments in Mexico aims to reveal discrepancies in order to identify whether the advertising aligns adequately with what is offered. This article focuses on proposing a comparative analysis methodology between the advertising image and the real characteristics of the constructed developments, using the Bajío region of Mexico as a case study. The goal is for the results of this methodology to allow, in future studies, a contrast between the perception and experience of the residents of these residential developments and the current real estate market offerings.

1. Introducción

Entender la vivienda como un producto de consumo ha alterado las dinámicas de acceso al mercado inmobiliario. Además, ha cambiado las prioridades de los compradores, quienes ahora valoran más las amenidades y las experiencias que ofrece un desarrollo

inmobiliario habitacional. Convirtiendo estas amenidades en el sueño y aspiraciones a alcanzar incluso por encima de las características de las propias viviendas. En este sentido, en los nuevos desarrollos dirigidos a las clases altas en México, la venta de viviendas está sumamente relacionado con el área de la mercadotecnia, donde cada

transacción es parte de un complejo sistema de influencias y manipulaciones de símbolos en el ámbito económico y social [1].

Estas estrategias no se limitan a ofrecer una propiedad, sino que buscan crear y reforzar necesidades ficticias a través de un juego de persuasiones y aspiraciones. Es importante señalar que la vivienda no solo cubre una carencia, sino que se convierte en el objeto deseado y la necesidad a cumplir [1].

Con la intención de desentrañar las promesas publicitarias y contrastarlas con la realidad construida y detectar hasta qué punto dichas promesas se materializan se presenta una metodología de análisis tomando como objeto de estudio el *Otomí Residencial*. Desarrollo exclusivo ubicado en San Miguel de Allende, Guanajuato (Fig. 1). Este fraccionamiento de lujo fue inaugurado en 2011 y se caracteriza por su enfoque en la vida ecuestre y la integración con la naturaleza, ofreciendo áreas verdes y actividades en el lago de la Presa Allende. *Otomí Residencial* cuenta con instalaciones como un club hípico, casas residenciales de diseño arquitectónico contemporáneo mexicano y amenidades que

promueven un estilo de vida sofisticado y campestre [8].

2. Metodología

La metodología se enfoca en comparar el material publicitario del desarrollo Otomí Residencial con su estado construido actual. Se divide en 4 etapas. Primero, se recopilaron y analizaron de manera semiótica y retórica imágenes y videos promocionales para identificar las principales promesas visuales y narrativas. Luego, se documentó el sitio mediante material gráfico y visitas, evaluando cómo estas promesas se reflejan en la materialidad, distribución de espacios y amenidades. Se establecieron criterios de evaluación, para finalizar se analizó la congruencia entre lo proyectado y lo construido, identificando similitudes y discrepancias significativas

a) Recolección y análisis de material publicitario

Primero, se llevó a cabo una recopilación exhaustiva de las imágenes y videos publicitarios utilizados para la promoción del desarrollo Otomí Residencial. Este material incluye renders, videos promocionales y contenido en redes sociales. Se realizó un análisis semiótico y retórico como lo mencionan Heilbrunn & Hetzel el cual utilizan esta metodología para explorar la efectividad de las campañas publicitarias y entender cómo estas logran influir en las percepciones y emociones de su audiencia, es decir, no solo lo que se dice o se muestra, sino cómo se construye el mensaje y por qué provoca ciertos efectos en el receptor [2]. En esta investigación se identificaron las principales promesas visuales y narrativas, tales como el lujo, la exclusividad, el contacto con la naturaleza, y los estilos de vida proyectados. [6] [7]

b) Documentación del sitio construido

Se realizó un análisis de material gráfico arquitectónico y fotográfico actual del sitio, junto a una visita al sitio para



documentar el estado actual del desarrollo Otomí Residencial. Este trabajo implicó realizar registros de las características arquitectónicas y de las amenidades ofrecidas. El enfoque estará en evaluar la materialidad de las promesas publicitarias, es decir, la forma en que los conceptos de lujo, exclusividad, y contacto con la naturaleza se han traducido en materiales constructivos, espacios, acabados, y disposición de elementos naturales [4] [5].

c) Criterios de evaluación

Para realizar un análisis objetivo, se definió una serie de criterios basados en la congruencia entre las promesas visuales y narrativas de la publicidad y lo construido [4] [5]. Estos criterios incluyen:

- *Materialidad:* Calidad de los materiales empleados en relación con lo proyectado en los renders publicitarios.
- *Espacios y distribución:* Comparación de las dimensiones y organización de los espacios proyectados en las imágenes publicitarias frente a la realidad construida.
- *Amenidades y entorno natural:* Evaluación de la presencia y calidad de las amenidades anunciadas.

c) Análisis de congruencia

El análisis comparativo se estructuró identificando las diferencias o similitudes entre las imágenes publicitarias y el sitio construido, para determinar el nivel de congruencia entre la proyección inicial y su materialización. Este análisis incluyó la identificación de elementos que se han cumplido, superado o, por el contrario, que presenten una discrepancia significativa respecto a las promesas publicitarias.

3. Resultados

Los elementos naturales, como áreas verdes, lagos y naturaleza, contribuyen a una narrativa de estilo de vida que enfatiza *el bienestar*

emocional y físico en armonía con el entorno. A través de la simbolización de protección, transición y comodidad, se promueve una visión de comunidad y serenidad que invita a escapar del bullicio urbano. Sin embargo, estos espacios naturales están fuertemente vinculados a valores de exclusividad, estatus social y sofisticación, lo que indica que este estilo de vida se asocia con un sentido de distinción y éxito, reforzando una identidad de consumo ostentoso y privilegio en los residentes. La mercadotecnia refuerza el poder sugestivo de promover nuevos estilos de vida al adquirir una vivienda, asociando estos estilos con lujo y exclusividad. La publicidad proyecta estos valores como fundamentales para la auto representación y el sentido de la vida, en una sociedad enfocada en la apariencia. Para persuadir a los consumidores, la naturaleza y los estilos de vida saludables se utilizan como herramientas clave, convirtiendo la compra de una vivienda en una promesa de satisfacción, accesible solo para unos pocos privilegiados [3].

La congruencia entre lo prometido y lo construido es uno de los aspectos más críticos. La falta de coherencia entre la publicidad y la realidad, como en el caso de la vegetación semiseca o las áreas que parecen más pequeñas en la realidad, puede generar una discrepancia para los compradores o residentes que fueron atraídos por la narrativa publicitaria. Esto pone en duda la autenticidad de las promesas y plantea preguntas sobre la ética de utilizar imágenes tan estilizadas para vender un concepto de vida que no siempre es alcanzado en la práctica. A través de las imágenes publicitarias, se observa cómo se construye una narrativa aspiracional que simboliza valores como el lujo, la exclusividad, la conexión con la naturaleza y el bienestar. Elementos como los árboles, el agua, y las áreas deportivas no solo cumplen una función estética, sino que se presentan como símbolos de un estilo de vida superior, destinado a una élite que busca escapar del caos urbano para habitar en un entorno que promueve la paz, la serenidad y el estatus social [3].

Cada elemento se carga de un valor simbólico que va más allá de lo físico, transmitiendo una identidad y una promesa de calidad de vida elevada.

Sin embargo, cuando se examina la realidad construida, la materialización de estos símbolos a menudo no alcanza el nivel esperado. Si bien algunas promesas se cumplen, como la construcción de áreas de equitación y ciertos espacios verdes, otros elementos revelan discrepancias importantes. La vegetación, que en los renders aparece exuberante y vibrante, en la realidad se muestra descuidada o seca, lo que disminuye el impacto visual y simbólico que se quería transmitir. Además, el tamaño de las casas o el estado de algunas infraestructuras no refleja la imagen proyectada en la publicidad.

Tabla 1. Correspondencias materialidad / Congruencia

Íconos, personajes y/o objetos	Simbolización	Materialidad	Realidad	Congruencia
Fotograma 1. Acceso principal	-Bienvenida -Protección -Acceso a lo Especial	-Caseta de Acceso	-Se observa descuidada -La vegetación que lo rodea no coincide con la de la publicidad	Neutro
Fotograma 2. Camino	-Transición -Crecimiento	-Camino empedrado entre arboles -Un lago que acompaña a el camino	-Se recalca que las dimensiones son escasas	Negativo
Fotograma 3. Club hípico	-Deporte -Elegancia -Riqueza -Caballos	-Existen 4 arenas y 2 pistas de equitación (13.076 m2) -Eventualmente se realizan competencias -Casa club -Restaurante -Mega domo	-Áreas descuidadas y escasas comparado con la publicidad	Positivo
Fotograma 4. Conjunto de casas	-Refugio de paz y serenidad	-255 lotes de diferente tamaño (300-900m2) (113.20m2) -3 tipos de prototipo	-Se observan pocas casas en el área residencial	Negativo

Tabla 1. Correspondencias materialidad / Congruencia de la publicidad y lo real Otomí Residencial, San Miguel de Allende, Gto. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Esta metodología es útil para evaluar la coherencia entre las promesas publicitarias y la realidad construida en desarrollos residenciales. Al combinar el análisis semiótico y retórico del material publicitario con la documentación y evaluación del sitio construido, permite una comparación detallada que revela el grado de cumplimiento de los conceptos promocionados, como el lujo, la exclusividad y el contacto con la naturaleza. Además, los criterios de evaluación definidos proporcionan una base objetiva para identificar similitudes y discrepancias significativas, lo que facilita una comprensión clara de cómo se materializan las promesas visuales y narrativas en la realidad.

Agradecimientos

Agradezco a CONAHCYT y a mi directora de tesis la Dra. Reina Loredo por el apoyo brindado en este tiempo que ha abarcado la investigación.

Referencias

[1]	A. Rocha Tejeda, "La Vivienda como resultado de la objetividad consumista," <i>Revista Legado de Arquitectura y Diseño</i> , pp. 95–102, 2014
[2]	B. Heilbrunn and P. Hetzel, "La pensée bricoleuse ou le bonheur des signes: Ce que le marketing doit à Jean-Marie Floch," <i>Décisions marketing</i> , pp. 19-23, 2003.
[3]	V. Béjar, R. Loredo "Estilos de vida: El nuevo paradigma en la publicidad residencial" presentado en la tercera edición de Jornadas interdisciplinarias de Arquitectura, Palermo, Argentina, 2024.
[4]	"Otomí San Miguel." <i>Otomí Residencial & Ecuestre</i> . [Online]. Available: https://otomi.mx/ . [Accessed: Sep. 20, 2024].
[5]	"Fraccionamiento Otomí Residencial." Google Earth. [Online]. Available: https://earth.google.com/web/search/fraccionamiento+otomi+residencial/@20.90357759,-100.78947478,1862.20373743a,1069.36103327d,35y,2.62080741h,0t,0r . [Accessed: Sep. 21, 2024].
[6]	J. M. Floch, <i>Semiótica, Marketing y Comunicación. Bajo los signos las estrategias</i> . Madrid: Paidós, 1993
[7]	R. Barthes, "Introducción al análisis estructural de los relatos," en <i>El análisis estructural</i> , S. Nicolini, Ed. Buenos Aires: Centro Editor de América Latina, 1977.
[8]	Otomí Ecuestre Residencial. "Otomí Equestrian Residencial." [Online]. Available: https://otomi.mx/ . [Accessed: 26-Sep-2024].

Tendencias Globales en Metodologías Ágiles: Un Estudio Sistemático en Sectores más allá de la industria de *Software*

Global Trends in Agile Methodologies: A Systematic Study in Sectors Beyond the Software Industry

Montalvo Garfias Victor Ernesto
División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
vicmg5813@gmail.com

Palabras clave: ICP, Metodologías ágiles, Scrum, Revisión Sistemática, Kanban, Administración de proyectos.

Resumen- En esta revisión sistemática de la literatura se analizan los sectores de aplicación para metodologías ágiles diferentes a su área de aplicación original: la industria de *software*. Con el respaldo de la metodología para revisiones sistemáticas de literatura PRISMA, se analizaron 99 artículos académicos con el objetivo de identificar tendencias en diferentes rubros. Primero, los marcos de trabajo más utilizados (Scrum, Kanban, XP). Además, la distribución geográfica para la adopción de las metodologías ágiles. Finalmente, los sectores de desarrollo diferentes a la industria de *software* como lo son educación, manufactura y salud. A través de los resultados se consigue identificar que Scrum continúa siendo el marco de trabajo dominante, América del Norte y Europa se posicionan como líderes en la aplicación de estas metodologías y en el sector educación estas metodologías están siendo implementadas para fomentar entornos de aprendizaje más flexibles y dinámicos. Este trabajo presenta un panorama general sobre la evolución de metodologías ágiles y resalta la necesidad de más instigaciones en sectores diferentes a la industria de *software*.

Keywords: ICP, Agile Methodologies, Scrum, Systematic Review, Kanban, Project Management.

Abstract- This systematic review analyzes the application sectors for agile methodologies other than their original area of application: the software industry. With the support of the PRISMA methodology for systematic literature reviews, 99 academic articles were analyzed with the objective of identifying trends in different areas. First, the most used frameworks (Scrum, Kanban, XP). Additionally, the geographical distribution for the adoption of agile methodologies. Finally, development sectors other than the software industry such as education, manufacturing and health. Through the results, it is possible to identify that Scrum continues to be the dominant framework, North America and Europe are positioned as leaders in the application of these methodologies and in the education sector these methodologies are being implemented to promote more flexible and dynamic learning environments. This work presents a general overview of the agile methodologies evolution and highlights the need for more instigations in sectors other than the software industry.

1. Introducción

El Manifiesto Ágil [1], publicado en 2001 surgió como una alternativa a la gestión de proyectos tradicional. Sus principales diferenciadores son la adaptabilidad, colaboración y entrega de resultados en tiempos cada vez menores. La filosofía detrás de las metodologías ágiles surge como una respuesta a la necesidad de producir *software* de una forma más rápida y flexible, sin embargo, actualmente los sectores de aplicación se extienden a otros ámbitos como la educación, salud y manufactura [2]. Como resultado, las organizaciones que han incorporado a las metodologías ágiles en sus procesos han conseguido responder de forma efectiva a los cambios inesperados en el entorno productivo [3].

Las metodologías ágiles están compuestas por diferentes marcos de trabajo que tienen características muy específicas para sus áreas de aplicación pero que al mismo tiempo comparten paradigmas propios de la agilidad. Los marcos de trabajo más utilizados son Scrum, Kanban y *Extreme Programming* (XP). Todos ellos coinciden en su enfoque hacia ciclos de trabajo cortos e iterativos que permiten evaluaciones y correcciones dinámicas [4]. Específicamente, con Scrum se ha conseguido obtener una estructura de *Sprints* (pequeños ciclos de trabajo) y objetivos claramente definidos que han permitido evolucionar rápidamente a la industria de *software*. Sin embargo, cuando se han buscado adaptar estas formas de trabajo a otros sectores de desarrollo ha sido necesario modificar ciertos procesos para que consigan funcionar en escenarios donde, por ejemplo, no es tan sencillo renovar iteraciones de un producto [5].

Los investigadores en el sector educativo han señalado un especial interés en la aplicación de metodologías ágiles en sus procesos

estratégicos. Por ejemplo, se ha mostrado que una estrategia ágil ofrece un enfoque más flexible para gestionar el proceso de enseñanza y aprendizaje al facilitar el ajuste de contenidos y actividades en función del comportamiento de los estudiantes [6].

Aún cuando es fácil identificar el beneficio de adoptar metodologías ágiles en otros sectores diferentes a la industria de *software* su implementación presenta diferentes desafíos. Por ejemplo, la resistencia al cambio, la falta de capacitación o las diferencias culturales pueden convertirse en potenciales obstáculos al momento de buscar una transición de metodologías [7]. Por otra parte, en otros sectores como manufactura y salud aún no existe suficiente evidencia que respalde de forma sólida la viabilidad de estas metodologías. Por ello, es importante desarrollar un análisis que ofrezca un panorama general y crítico sobre las metodologías ágiles y su estudio.

Este trabajo tiene como principal objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura académica bajo el enfoque PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta Analyses*, por sus siglas en inglés) [8]. Se busca hacer la identificación de tendencias en el uso de metodologías ágiles desde una perspectiva, temporal, demográfica y de sector de desarrollo.

En la siguiente sección se describe la metodología utilizada para la recolección y análisis de los artículos académicos. Finalmente se muestra una compilación de los resultados encontrados y la discusión que los mismos representan.

2. Metodología

La metodología de este trabajo fue respaldada con la aplicación del enfoque PRISMA para la revisión sistemática de la literatura. [8]. A

través de este enfoque es posible garantizar la transparencia y estudio exhaustivo para el análisis de textos científicos al incluir estudios relevantes y de alta calidad.

La primera etapa de este proceso consiste en definir los criterios de inclusión y exclusión para la búsqueda de artículos académicos.

1. Criterios de inclusión

Los criterios que se utilizaron para incluir sólo los estudios que presentaran datos empíricos para la adopción de metodologías ágiles en diferentes contextos de desarrollo fueron:

- 1.1. Estudios que presentaran metodologías ágiles como Scrum, Kanban, Lean o XP.
- 1.2. Artículos en inglés, con revisión por pares entre el 2010 y 2024.
- 1.3. Artículos que presentan resultados medibles o análisis cualitativos sobre el impacto de las metodologías ágiles.

2. Criterios de exclusión

Por otra parte, fueron descartadas aquellas publicaciones que:

- 2.1. No aportaran evidencia empírica.
- 2.2. Tuvieran como base sólo revisiones teóricas.
- 2.3. Presentaran resultados preliminares sin suficiente respaldo metodológico.

3. Proceso de búsqueda

Para asegurar una cobertura adecuada y calidad en las publicaciones seleccionadas, se optó por utilizar *Scopus* e *IEEE Xplore* como bases de datos primarias. Estas bases de datos se eligieron por su enfoque en literatura revisada por pares y reconocimiento en el ámbito académico. Las palabras utilizadas

tuvieron todas relación con metodologías ágiles: *Agile Methodologies*, *Scrum*, *Kanban*, *Lean Development* y *XP*. También se incluyeron palabras clave relacionadas a herramientas metodológicas: *statistical analysis*, *survey*, *data analysis* y *quantitative study* todas utilizando el operador OR. Finalmente se limitaron a los años de publicación entre 2010 y 2024.

4. Proceso de selección

La selección se compuso de tres etapas principales:

- 4.1. Identificación: Como resultado de los primeros filtros, con base a los criterios de inclusión y exclusión, se obtuvieron 683 artículos.
- 4.2. Evaluación y resumen: Se revisó el resumen de 200 artículos para determinar su relevancia y cumplimiento con los criterios de inclusión.
- 4.3. Revisión de texto completos: Para concluir, se realizó una revisión detallada de 100 artículos con enfoque a la metodología y resultados presentados.

5. Diagrama PRISMA

El diagrama PRISMA, que se presenta en la Figura 1, describe el flujo del proceso de selección de artículos, desde la identificación inicial hasta la inclusión final en el análisis.

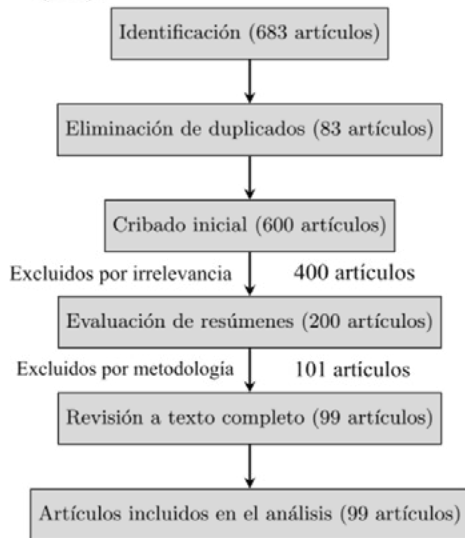


Figura 1 Diagrama PRISMA para el proceso de selección de artículos.

El proceso de selección se llevó a cabo en tres fases. Primero, 683 artículos fueron identificados a través de las bases de datos seleccionadas. Luego, tras aplicar los criterios de exclusión y eliminar duplicados, se consideraron 200 artículos para la revisión de texto completo. Finalmente, se incluyeron 99 artículos en el análisis final.

3. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los hallazgos obtenidos tras el análisis de los 99 artículos seleccionados. La revisión abarca tres aspectos fundamentales: la distribución por sectores de aplicación, la distribución geográfica de las investigaciones y las metodologías ágiles más frecuentemente adoptadas.

En la Figura 2 se presenta una tabla con la distribución de los artículos revisados por sector:

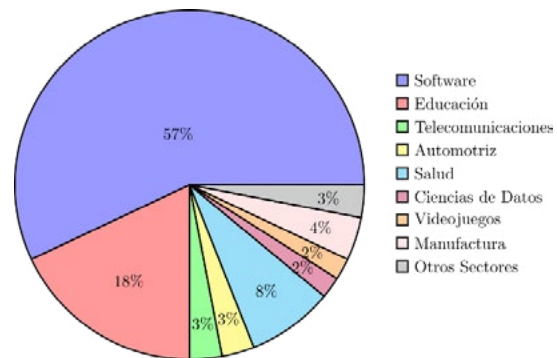


Figura 2 Distribución de artículos por sector

Los resultados indican que el sector de desarrollo de *software*, aún domina la aplicación de metodologías ágiles con un 57%. Sin embargo, otros sectores como el educativo (18%) y el de salud (8%) también comienzan a incorporar estas metodologías en sus procesos. Utilizar metodologías ágiles en la educación obedece a la necesidad de crear entornos de aprendizaje que se puedan adaptar a las necesidades cambiantes de los estudiantes [6].

Por otra parte, las metodologías ágiles han encontrado un lugar en la gestión de equipos multidisciplinarios permitiendo una mejor coordinación en proyectos de alta complejidad.

La Figura 3 ilustra la distribución de los artículos revisados por país o región:

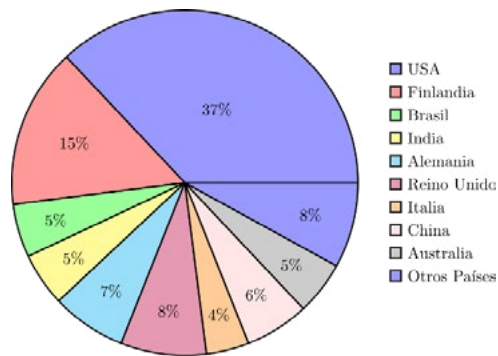


Figura 3 Distribución de artículos por país

En cuanto a la distribución geográfica de los estudios, USA y Finlandia lideran la producción académica en metodologías ágiles, con un 52% de los artículos provenientes de estas regiones. Sin embargo, se observa un crecimiento en la adopción de estas metodologías en Asia, especialmente en países como India y China, donde la implementación de enfoques ágiles se está utilizando como parte de sus estrategias de competitividad en el mercado global [5][8]

La gráfica de barras presentada en la Figura 4 ilustra la distribución de los artículos revisados por metodologías ágiles.

Scrum continúa siendo la metodología ágil más utilizada, abarcando un 54% de los artículos revisados. Esta metodología destaca por su enfoque iterativo, basado en sprints, que facilita la entrega incremental de productos. A pesar de esto, se observa un creciente interés en enfoques híbridos como Scrum/Kanban, que permiten a las organizaciones combinar lo

mejor de ambos enfoques para atender necesidades específicas.

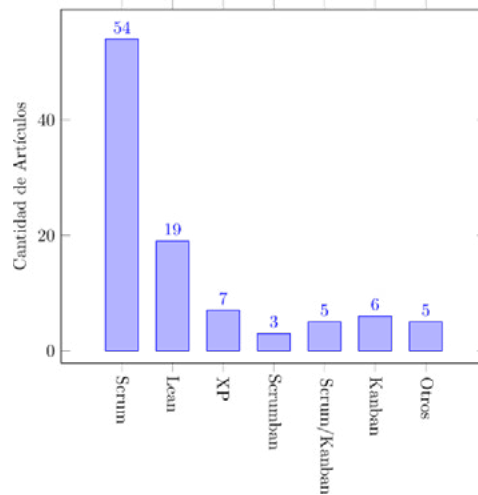


Figura 4 Cantidad de artículos por metodología

El uso de enfoques híbridos es especialmente popular en sectores como la manufactura, donde la flexibilidad que ofrece Kanban se combina con la estructura organizada de Scrum para gestionar tanto la producción a gran escala como los proyectos más pequeños y personalizados [7].

Estos resultados subrayan la popularidad constante de Scrum como la metodología ágil preferida en múltiples sectores, especialmente en el desarrollo de software. Sin embargo, el creciente interés por enfoques híbridos y su adaptación a distintos sectores revela que las organizaciones están buscando ajustar las metodologías ágiles a sus necesidades específicas.

La adopción de metodologías ágiles y lean ha demostrado ser sumamente adaptable en una variedad de sectores, desde la manufactura hasta la educación y la atención médica. Estudios recientes subrayan la eficacia de estas metodologías para optimizar la productividad y eficiencia en entornos operativos complejos, aportando además una visión completa sobre los desafíos de integrar tecnología y factores humanos [6], [3]. Esta expansión hacia sectores no tradicionales muestra que, aunque

Lean 4.0 y las tecnologías de Industria 5.0 ofrecen claros beneficios, también enfrentan desafíos, particularmente al intentar aplicar prácticas tradicionales de manufactura en contextos cada vez más digitalizados y centrados en el factor humano [6].

En el sector farmacéutico, Tetteh-Caesar y sus colegas encontraron que Lean 4.0 permite mejoras importantes en eficiencia, reduciendo desperdicios en un 57% y aumentando la confiabilidad en calidad en más del 50%. Sin embargo, estos beneficios vienen acompañados de una necesidad considerable de inversión en capacitación y en tecnología de procesamiento automatizado de datos [5]. Resultados similares se observan en la industria metalúrgica peruana, donde la combinación de lean manufacturing con mantenimiento productivo total (TPM) incrementó la productividad en un 10% y redujo los tiempos de preparación en un 32.04% [8].

La interacción de metodologías ágiles con herramientas educativas también resulta prometedora. En el ámbito universitario, estudios recientes muestran cómo la implementación de Kanban y Scrum facilita tanto el aprendizaje autónomo como la gestión efectiva de proyectos estudiantiles [15], [18]. Estos hallazgos coinciden con investigaciones anteriores que destacaban la versatilidad de las metodologías ágiles para desarrollar competencias, tanto en contextos profesionales como educativos [16].

Desde una perspectiva sistémica, el enfoque holístico para medir la "leanness" en las organizaciones, como el propuesto por Tayaksi et al., aporta una estructura sólida al análisis de la efectividad y eficiencia. Aplicando metodologías como la lógica difusa y la evaluación multicriterio, este enfoque brinda una herramienta práctica para diagnosticar y mejorar continuamente,

permitiendo a las empresas monitorear su avance hacia la sostenibilidad y eficiencia [7].

Es importante señalar algunas limitaciones encontradas en el proceso de revisión que podrían afectar la implementación de metodologías ágiles a sectores diferentes al *software*. Una limitación notoria es la resistencia al cambio organizacional debido a influencias culturales y estructurales de cada campo en específico. Además, la falta de formación sobre metodologías ágiles y escasez de estudios que midan el impacto de su aplicación en el largo plazo son factores que deben considerarse como obstáculos para la transición y adopción de dichas metodologías.

4. Conclusiones

El análisis realizado en esta revisión demuestra que las metodologías ágiles, aunque surgieron en el ámbito del desarrollo de software, han trascendido a otros sectores con resultados positivos. El uso extendido de metodologías como Scrum y Kanban en contextos tan diversos como la educación, la manufactura y la salud, subraya la flexibilidad y adaptabilidad que estos enfoques ofrecen, permitiendo a las organizaciones ajustarse de manera eficiente a las demandas cambiantes de sus proyectos.

Uno de los hallazgos más significativos es la creciente adopción de metodologías ágiles en el sector educativo. En este contexto, se han utilizado no solo para organizar proyectos de aprendizaje, sino también para mejorar la interacción entre estudiantes y profesores, fomentando una mentalidad iterativa y colaborativa. Esto sugiere que la aplicación de enfoques ágiles en la enseñanza puede jugar un papel clave en la evolución de las metodologías pedagógicas.

Además, el estudio destaca que, aunque América del Norte y Europa siguen liderando

en términos de publicaciones y adopción, se observa un notable crecimiento en regiones como Asia. Países como India y China, motivados por su búsqueda de competitividad global, han comenzado a implementar enfoques ágiles en una variedad de industrias. Esto indica una expansión geográfica que probablemente continúe en los próximos años, con el potencial de influir en otros sectores clave dentro de estas economías emergentes.

En resumen, el futuro de las metodologías ágiles parece prometedor. Si bien el desarrollo de software sigue siendo su principal campo de aplicación, los sectores que ya han adoptado estos enfoques están obteniendo beneficios notables en términos de eficiencia y capacidad de adaptación. La expansión de estas prácticas hacia nuevos sectores y regiones indica que estamos solo en el comienzo de una evolución que continuará transformando la forma en que se gestionan los proyectos a nivel global.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo extienden un profundo agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo financiero brindado para el desarrollo de esta investigación. También, agradecen a la Universidad Autónoma de Querétaro por los incentivos académicos que hicieron posible esta revisión sistemática de la literatura.

Referencias

[1] K. Beck, M. Beedle, A. van Bennekum, A. Cockburn, W. Cunningham, M. Fowler, J. Grenning, J. Highsmith, A. Hunt, R. Jeffries, J. Kern, B. Marick, R. C. Martin, S. Mellor, K. Schwaber, J. Sutherland, and D. Thomas, "Manifesto for Agile Software Development," 2001.

[2] K. Schwaber and J. Sutherland, *Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time*. Crown Publishing Group, 2014.

[3] W. M. P. Aalst, H. A. Reijers, and L. Maruster, "Process mining beyond workflows," *Computers in Industry*, vol. 161, p. 104126, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104126>.

[4] N. Winarno, D. Rusdiana, R. Riandi, E. Susilowati, and R. M. A. Afifah, "Implementation of Integrated Science Curriculum: A Critical Review of the Literature," *Journal for the Education of Gifted Young Scientists*, vol. 8, no. 2, pp. 795-817, 2020.
<https://doi.org/10.17478/jegys.675722>.

[5] M. G. Tetteh-Cesar, S. Gupta, K. Salonitis, and S. Jagtap, "Implementing Lean 4.0: A Review of Case Studies in Pharmaceutical Industry Transformation," *Technological Sustainability*, vol. 3, no. 3, pp. 354-372, 2024.
<https://doi.org/10.1108/TECHS-02-2024-0012>.

[6] K. M. Eriksson, A. K. Olsson, and L. Carlsson, "Beyond Lean Production Practices and Industry 4.0 Technologies toward the Human-Centric Industry 5.0," *Technological Sustainability*, vol. 3, no. 3, pp. 286-308, 2024.
<https://doi.org/10.1108/TECHS-11-2023-0049>.

[7] C. Tayaksi, M. Sagnak, and Y. Kazancoglu, "A New Holistic Conceptual Framework for Leanness Assessment," *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, vol. 5, no. 4, pp. 567-590, 2020.
<https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2020.5.4.47>.

[8] R. M. Florez-Cáceres, C. E. Huamán-Echevaría, and J. C. Quiroz-Flores, "Improving Productivity in an SME in the

Metalworking Sector through Lean Manufacturing and TPM Tools: A Case Study in Peru," *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 91-109, 2024. <https://doi.org/10.7166/35-2-3013>.

[9] A. Galeazzo, A. Furlan, D. Tosetto, and A. Vinelli, "Are lean and digital engaging better problem solvers? An empirical study on Italian manufacturing firms," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 44, no. 6, pp. 1217-1248, 2024. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-06-2023-0477>.

[10] H. H. Saleh, Z. A. Abbas, N. Latif, and Z. T. Khalil, "Agile management in healthcare: Improving patient outcomes through flexibility and responsiveness," *Journal of Ecohumanism*, vol. 3, no. 5, pp. 633-649, 2024. <https://doi.org/10.62754/joe.v3i5.3928>.

[11] M. E. Kreye, T. R. Hernandez, and S. Eppinger, "Translating agile management practices into a traditional industry context," *Journal of Product Innovation Management*, pp. 1-24, 2024. <https://doi.org/10.1111/jpim.12760>.

[12] M. Moso and O. A. Olanrewaju, "An application of lean techniques to construct an integrated management systems preventive action model and evaluation: Kaizen projects," *Processes*, vol. 12, no. 3, p. 1069, 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12061069>.

[13] R. Pozzi, V. G. Cannas, and T. Rossi, "Data science supporting lean production: Evidence from manufacturing companies," *Systems*, vol. 12, no. 3, p. 100, 2024. <https://doi.org/10.3390/systems12030100>.

[14] A. Ahimbisibwe, M. Cavana, and U. Daellenbach, "Empirical comparison of traditional plan-based and agile methodologies: Critical success factors in software projects," *International Journal of Project Management*, vol. 35, no. 3, pp. 21-32, 2017.

[15] H. Kaur, "Agile methodologies in higher education: Implementing Kanban in university project work," *Journal of Applied Research in Higher Education*, vol. 11, no. 4, pp. 643-654, 2019.

[16] M. McHugh, F. McCaffery, and G. Coady, "An Agile framework for Scrum implementation in higher education," *Journal of Applied Learning Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 12-19, 2013.

[17] J. Bick, M. Spohrer, and C. Hossfeld, "Agile Learning: Applying Agile Principles to University Courses," *Computer Science Education*, vol. 27, no. 2, pp. 101-114, 2017.

[18] N. Hidayati and H. Hwang, "Agile learning: Integrating Scrum into the online classroom," *Education and Information Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 23-35, 2020.

[19] J. Tavares, A. Carvalho, and P. Costa, "Scrum and XP in higher education: Lessons learned from running large-scale courses," *Education and Training*, vol. 59, no. 6, pp. 650-662, 2017.

[20] H. Hobbs, "Scrum in higher education: Experiences from applying agile methodologies in a higher education context," *Journal of Applied Research in Higher Education*, vol. 9, no. 3, pp. 249-265, 2017.

Adaptaciones estructurales actuales entre vigas de madera y concreto: una revisión

Current structural adaptations between timber and concrete beams: a review

Queb Paz Victor Hugo

Facultad de Ingeniería Posgrado Maestría en Ciencias de la Construcción.

Universidad Autónoma de Querétaro, UAQ

Querétaro, México

vqueb27@alumnos.uaq.mx

Palabras clave: CON, Compuestas, Desarrollo, Carga, Refuerzo.

Keywords: CON, Composite, Performance, Load, Reinforcement

Resumen- Se muestra una recopilación de las distintas adaptaciones tecnológicas en vigas de concreto reforzado, huecas y madera que buscaron lograr un ahorro en materiales y estabilizar valores de tensión-compresión necesarios en la construcción de estructuras según normativas mexicanas, europeas y distintos criterios de diseño aplicables para vigas perimetralmente apoyadas incluso de poder prescindir del acero de refuerzo a través de la sustitución de materiales e implementación de técnicas de desarrollo experimental reciente. Este estudio integra la carga que pueda soportar el elemento sobre una unidad de volumen considerando la variabilidad de técnicas y dimensionamientos de los elementos investigados.

Abstract- A compilation of the different technological adaptations in concrete, hollow and wooden beams is presented, which attempted to achieve savings in materials and stabilize tension-compression values necessary in the construction of structures according to Mexican and European regulations and different design criteria applicable to perimeter-supported beams, even if reinforcing steel could be dispensed with by replacing materials and implementing recently developed experimental techniques. The study reduces the load capacity that the element can support on a unit of volume, considering the variability of techniques and dimensions of the elements investigated

Introducción

La madera en la industria de la construcción es muy solicitada debido a sus ventajas de bajo costo además de ahorrar de energía [1], cuyas características mecánicas son muy solicitadas para casi cualquier tarea, llegando a ser un material casi irremplazable; ya que ofrece una alternativa rentable con grandes capacidades

Una comparación de energía [5] ha sugerido que la madera y el concreto tienen valores de energía incorporada más bajos que el acero, por rangos significativamente diferentes (0.6–

de carga, excelentes capacidades de flexión y bajo costo, que incluso pueden ser mejoradas sus capacidades con distintas composiciones como las fibras de carbono [2]. Además, sobresalen aquellas maderas de fácil producción, pero con grandes capacidades de carga como la madera de Paulownia [3], Bambú [1] o Eucalipto [4] como ya se ha demostrado y que requieren menos energía en comparación del concreto o del acero.

41.2 MJ/kg para la madera, 0.9-13.1 MJ/kg para el hormigón, 8.9-59 MJ/kg para el acero). La comparación entre construcciones de casas predominantemente de madera, concreto y acero indica que contienen rangos de 185-280

GJ, 265-520 GJ y 455-650 GJ respectivamente. Lo que ha demostrado que construir con madera y concreto es lo más sostenible desde 1995 [6].

La integración de elementos orgánicos al concreto también ha sido investigada como alternativa de refuerzo al acero en el concreto armado y estructuras [7] que para efecto de esta investigación se evaluó la capacidad de carga a cortante de elementos compuestos, que en la actualidad conforman a una viga comparándose con las vigas de concreto.

Esta variabilidad de materiales y técnicas de construcción innovadores y cada vez más rentables, como aquellos con núcleo hueco, los cuales ayudan a reducir el peso en comparación de las secciones sólidas y minimizar la cantidad de material pero esto afecta en el rendimiento a la flexión y al corte [8], [9], [10], incluso Azad y Hakeem, sugieren que la construcción de elementos alveolares compuestos solo es apropiada para losas de piso unidireccional simplemente apoyadas donde la capacidad de corte no fuera requisito de diseño [11], también se establece que la falla común de las vigas huecas es alrededor del núcleo [12].

La mayoría de los compuestos actuales constan de Polímeros de Fibra Reforzados (FRP), los cuales se utilizan ampliamente en infraestructura marina, industrial y civil como materiales estructurales y de refuerzo con la ventaja de ser livianos, de alta resistencia y flexibilidad de diseño además de una resistencia a la corrosión [13], [14], [15] tanto en fibra de carbono y fibra de vidrio son comunes y de bajo costo al momento de reforzar un sistema..

Distintos estudios han evaluado el comportamiento de estas distintas evoluciones en lo estructural y sus capacidades que demuestran que las disposiciones de refuerzo no afectan significativamente las capacidades de resistencia de las vigas compuestas en vigas

de madera [3], [4], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], con concreto [27], [29], [30], [31], [25], [26] y núcleo hueco [27], [28], [29], [30], con excepción de la demostración de integración de desechos de aserrín [31]. No necesariamente reforzados con metal, principalmente haciendo uso de GFRP y CFRP.

1. Método de sometimiento a cargas en vigas

La selección de datos para esta investigación constó de pruebas de carga a vigas sin importar sus dimensiones ni modelos constitutivos, se analizó su comportamiento al punto de fallo por cortante y flexión contenidos en los artículos de los cuales algunos análisis están soportados por análisis de Elemento Finito, Criterios de diseño estandarizados o investigaciones de mejoramiento.

El criterio de selección se muestra en la Figura 1, limitado a las investigaciones de los últimos 15 años.

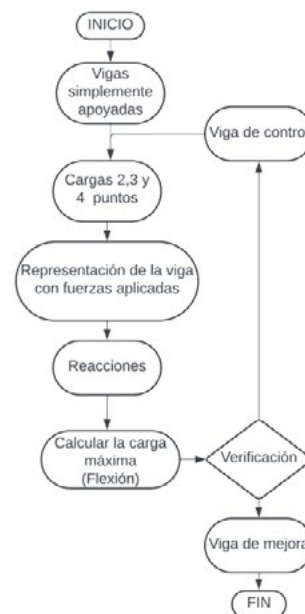


Figura 1. Procesamiento de datos para la selección de artículos.

En este estudio se valoraron todas las vigas compuestas en la siguiente categoría.

COMPOSICIÓN DE MATERIALES

Las vigas se dispuso en sus componentes fundamentales de la siguiente manera según la Figura 2.

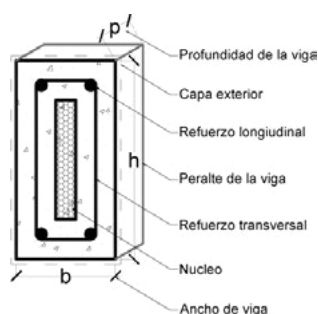


Figura 2. Disposición y selección de componentes del muestreo de vigas analizadas.

a) Volumen principal

En la mayoría de las muestras se utilizó concreto a base de cemento Portland ordinario, de acuerdo con ASTM C31[32], todas pruebas fueron evaluadas a compresión promedio de 32 MPa durante 28 días (desviación estándar $\sigma = 3.5$). Por otro lado, suelen aplicarse refuerzos longitudinales de material variable, principalmente acero.

b) Núcleo

Los núcleos se conforman por barras de acero, Barras de GFRP, Bambú, Poliestireno, Madera, Glulam, MGP10 (Madera estructural de pino), WPC (Compuesto de madera sintética), Concreto Lafarge o inclusive huecos.

Algunas mezclas de concreto aditivos y sustitutos a los agregados como lo pueden ser Vidrio molido o aserrín.

c) Capa exterior

Se utilizan principalmente hojas, capas y placas de materiales como Fibra Reforzada de Polímero de Vidrio (GFRP) o Polímero

Reforzado de Fibra de Carbono (CFRP), Tiras de Bambú o Glulam (Laminado con resinas), LVL (Chapa de madera laminada), Malla de alambre o Malla de Fibra de Vidrio, Estribos, Barras de acero, HPC (Concreto de alto rendimiento), Canales-U metálicos.

Criterios de diseño

Según el Eurocódigo [32] se limitó el diseño a Carga Última de Servicio (ULS) con peralte efectivo según la Ecuación 1 con cargas mínimas de 18 kN para carga total de servicio.

$$ULS = \frac{h}{500} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde L es el claro efectivo entre 2 apoyos de una viga. Al aplicar los factores de carga a las acciones y los factores materiales a los valores característicos, se obtienen los valores de diseño de las acciones y propiedades. Las variaciones de carga y variables de carga se recopilaron del Eurocódigo.

Tabla 1. Propiedades de vigas según normativas.

Propiedades	Unidades	Estándar	Valor min.
Tensión	kN	Eurocódigo	18
	kN	ASTMC31	21
Compresión	MPa	Eurocódigo	20
	MPa	NMX-C-155-ONNCCE	17.5
	MPa	ACI 318	17
Deflexión	mm	Eurocódigo	L/250
	mm	ACI 318	L/240
	mm	NMX-C-155-ONNCCE	L/240
Longitud	m	Eurocódigo	L/h ≥ 16 o 20
	m	ACI 318	L/h ≥ 16 o 20

Variables de prueba

Se analizaron un total de 20 vigas con dimensiones variables las cuales fueron preparadas y reforzadas para examinar los

efectos de los efectos de diferentes parámetros de diseño tomando la forma más simple de la viga como valor de referencia para medir la mejora, nombrando los especímenes según los autores, que para efectos de esta investigación se conservaron solo los especímenes de mayor mejora en comparación con sus referentes.

Datos graficados en la siguiente Figura 1, donde se hace un cálculo teórico de la cantidad de peso en Newtons soportada en un centímetro cúbico de volumen respecto a sus especímenes de mejora. En el caso de [31] la prueba no es significativa pues decremanta las capacidades de la viga y por tanto se suponen valores en 0, no mostrados en la figura 3.

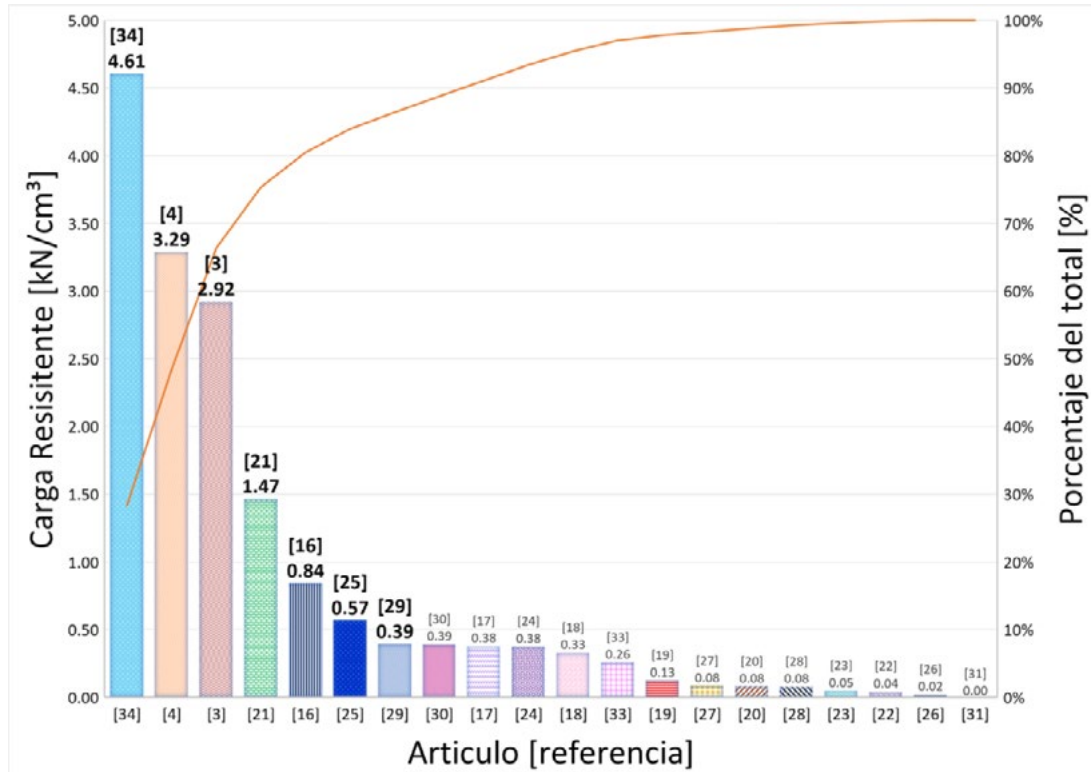


Figura 3. Capacidad de carga en N/cm^3 del muestreo 20 especímenes de vigas según su dimensionamiento y materiales.

2. Resultados y discusión

De los 20 trabajos analizados de vigas se conservaron los 3 más significativos [34],[3],[4] según su capacidad de carga por centímetro cúbico y la diferencia es considerable tratándose de la viga EPBS [34] ($4.60 N/cm^3$) y de madera de la parte baja del árbol Eucalipto [4]($3.29 kN/cm^3$), pasando por encima de las vigas de concreto, manteniendo la capacidad de corte, que además confirma lo ya dicho por Azaad y Hakim [11] respecto a

convertir una viga solida a hueca deteriora su rendimiento, comportamiento a flexión y al corte, por ello ninguna viga hueca ocupa un lugar de importancia en la Figura 3, quedando prácticamente descartadas de este estudio.

El resultado de la investigación arroja que la viga EPBS [34] mantiene las capacidades de carga a flexión sin sufrir deformación además de la capacidad de resistencia al corte. La sección según el fabricante puede reducirse en mínimo 30 cm de ancho.

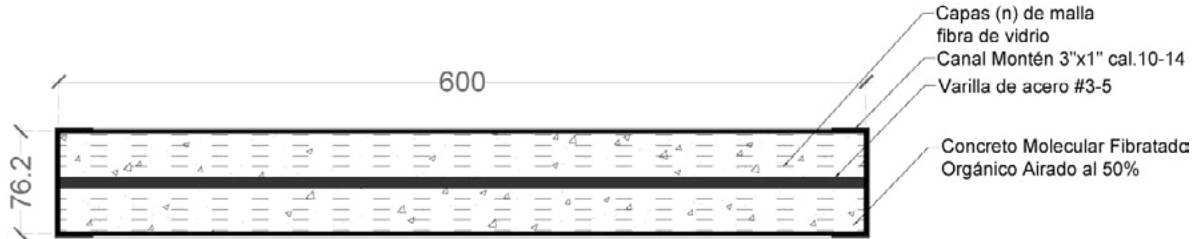


Figura 4. Sección de la viga EPBS . Cotas en mm. [3]

Con las mismas características se encontró que la madera de Eucalipto [4] y la madera de Balsa reforzada con PRFV [3](Poliéster Reforzado de Fibra de Vidrio) son ideales para la construcción con bajo costo energético y económico.

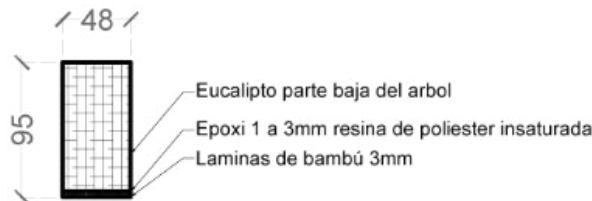


Figura 5. Sección de madera de Eucalipto bajo reforzada con 2 capas de Bambú en su parte inferior. Cotas mm. [4]

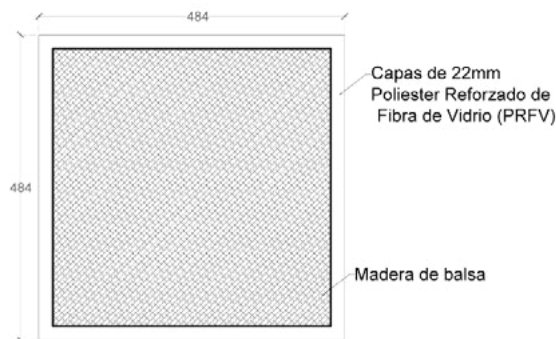


Figura 6. Sección de madera de Balsa reforzada en la capa exterior con capas de CFRP. Cotas en mm.[3]

En [3], el valor de una viga de madera fue superior al valor teórico de carga de las vigas de concreto armado soportando 3.29 N/cm^3 [4] y 2.92 N/cm^3 [3] de las vigas reforzada con madera en su parte inferior y recubiertas en comparación al primer sistema de concreto reforzado con acero de Miotto y Dias de 0.125 N/cm^3 [19], la capacidad de carga al fallo de la

madera contra el concreto reforzado es sustanciosa.

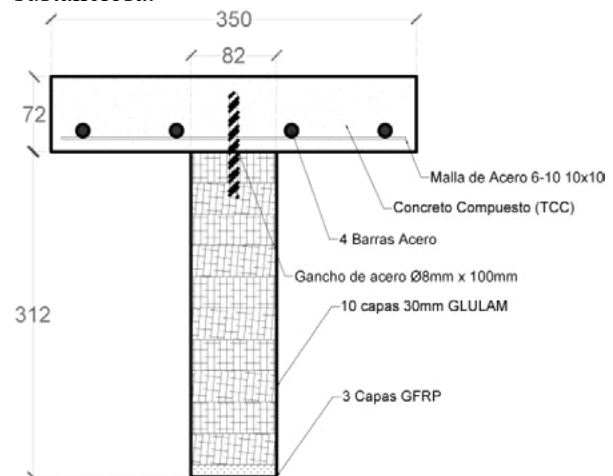


Figura 7. Sección de concreto compuesto reforzado y capas de GLULAM en su parte inferior reforzados con capas de GFRP. Cotas en mm.[19]

El valor de la viga TCC (Viga de Concreto Compuesto) reforzada con GFRP [19] de gran escala está diseñada como losa en una sola dirección por lo que resulta útil en el montaje pero carece de versatilidad por lo cual demuestra su poco desempeño 0.13 N/cm^3 siendo un elemento armado con acero, sin embargo el estudio [19] demostró que reforzar vigas con GFRP aumentó la resistencia media a la ruptura de las vigas TCC reforzadas en 22%.

Aunque la adición de aserrín de madera a una mezcla de concreto baja su resistencia [33] mantiene valores de aprovechamiento de materiales-dimensionamiento observados en la Figura 3 con valores de carga promedio de $0.39\text{-}0.33 \text{ N/cm}^3$ los cuales no son reforzados con acero.

3. Conclusiones

(1) Las vigas EPBS® son ideales para la construcción de vigas de carga y plataformas de piso sin sufrir deflexión. Su claro máximo estructural es 10m lo cual resulta útil para minimizar los apoyos. Además, confirma que usar SikaFlex-1a Gris® como sellador entre juntas es ideal para garantizar la hermeticidad entre elementos metálicos y de concreto.

(2) Los componentes del eucalipto *Oxytenanthera Abyssinica* podrán usarse potencialmente como materiales estructurales en la construcción de plataformas/tableros de piso, tanto de vigas primarias de carga o vigas secundarias de cerramiento.

(3) Recubrir un material con 22 mm de PRFV como la madera de balsa puede ser usado como vigas primarias y secundarias aunque tiene que estudiarse los peraltes permitidos para efectos estructurales si se desea reducir

por uno más convencional (100-200 mm) en la construcción de tableros o losas.

(4) Una composición entre estas 3 principales vigas [3], [4], [34] puede resultar en la construcción de plataformas/tableros además de conservar capacidad de corte de cada elemento para ser ajustable a construcciones existentes. De esta manera además ser sostenibles por ahorrar acero estas vigas podrán ser elementos reutilizables en otras construcciones.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por los recursos otorgados.

A la empresa EPBS® por brindar información y atención sobre su sistema patentado.

Referencias

- [1] H. Li, J. Su, Q. Zhang, A. J. Deeks, y D. Hui, "Mechanical performance of laminated bamboo column under axial compression", *Compos. Part B Eng.*, vol. 79, pp. 374–382, sep. 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.04.027.
- [2] T. W. Buell y H. Saadatmanesh, "Strengthening Timber Bridge Beams Using Carbon Fiber", *J. Struct. Eng.*, vol. 131, núm. 1, pp. 173–187, ene. 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:1(173).
- [3] H. M. Waqas *et al.*, "Conceptual Design of Composite Bridge Sandwich Structure", *Appl. Sci.*, vol. 11, núm. 1, Art. núm. 1, ene. 2021, doi: 10.3390/app11010214.
- [4] Y. Z. Yimer, A. G. Gualu, E. A. Amede, y L. M. Hailemariam, "Experimental Investigation on Flexural Strength Enhancement of Eucalyptus based Bamboo Composite Deck Board", *Cogent Eng.*, dic. 2023, Consultado: el 26 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23311916.2023.2188688>
- [5] J. Glover, D. O. White, y T. A. G. Langrish, "Wood versus Concrete and Steel in House Construction: A Life Cycle Assessment", *J. For.*, vol. 100, núm. 8, pp. 34–41, dic. 2002, doi: 10.1093/jof/100.8.34.
- [6] A. H. Buchanan y B. G. Honey, "Energy and carbon dioxide implications of building construction", *Energy Build.*, vol. 20, núm. 3, pp. 205–217, ene. 1994, doi: 10.1016/0378-7788(94)90024-8.
- [7] "Ghavami: Application of bamboo as a low-cost construction... - Google Scholar". Consultado: el 27 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://scholar.google.com/scholar_lookup?hl=en&publication_year=2008&pages=270-279&author=K+Ghavami&isbn=9780429207

341&title=Application+of+bamboo+as+a+low-cost+construction+material

[8] M. K. Rahman, M. H. Baluch, M. K. Said, y M. A. Shazali, “Flexural and Shear Strength of Prestressed Precast Hollow-Core Slabs”, *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 37, núm. 2, pp. 443–455, mar. 2012, doi: 10.1007/s13369-012-0175-8.

[9] M. Bindea, D. Moldovan, y Z. Kiss, “Flat slabs with spherical voids. Part I: Prescriptions for flexural and shear design”, *Civ. Eng.*, vol. 56, 2013.

[10] W. Ferdous, A. D. Almutairi, Y. Huang, y Y. Bai, “Short-term flexural behaviour of concrete filled pultruded GFRP cellular and tubular sections with pin-eye connections for modular retaining wall construction”, *Compos. Struct.*, vol. 206, pp. 1–10, dic. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.08.025.

[11] A. K. Azad y I. Y. Hakeem, “Flexural behavior of hybrid hollow-core slab built with ultra high performance concrete faces”, *Mater. Struct.*, vol. 49, núm. 9, pp. 3801–3813, sep. 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0755-7.

[12] M. Bindea, R. Zagon, y Z. Kiss, “Flat slabs with spherical voids. Part II: Experimental tests concerning shear strength”, *Civ. Eng.*, vol. 56, 2013.

[13] T. Gao y J.-U. Cho, “A study on damage and penetration behaviour of carbon fiber reinforced plastic sandwich at various impacts”, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 16, núm. 8, pp. 1845–1850, jul. 2015, doi: 10.1007/s12541-015-0240-9.

[14] E. R. Fotsing, C. Leclerc, M. Sola, A. Ross, y E. Ruiz, “Mechanical properties of composite sandwich structures with core or face sheet discontinuities”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 88, pp. 229–239, mar. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.10.037.

[15] L. Yan, B. Kasal, y L. Huang, “A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering”, *Compos. Part B Eng.*, vol. 92, pp. 94–132, may 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.02.002.

[16] M. M. Bakalarz y P. G. Kossakowski, “Numerical, Theoretical, and Experimental Analysis of LVL-CFRP Sandwich Structure”, *Materials*, vol. 17, núm. 1, Art. núm. 1, ene. 2024, doi: 10.3390/ma17010061.

[17] M. Naghipour, M. Nematzadeh, y Q. Yahyazadeh, “Analytical and experimental study on flexural performance of WPC–FRP beams”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, núm. 2, pp. 829–837, feb. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.104.

[18] X. Y. Xiong, Y. Q. Z. Wang, X. X. Lu, y R. J. Xue, “Bending Performance of Steel/CFRP Plate-Reinforced Core Timber Beams”, *Strength Mater.*, vol. 49, núm. 1, pp. 10–20, ene. 2017.

[19] J. L. Miotto y A. A. Dias, “Structural efficiency of full-scale timber–concrete composite beams strengthened with fiberglass reinforced polymer”, *Compos. Struct.*, vol. 128, pp. 145–154, sep. 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.03.054.

[20] M. F. Ozdemir, M. M. Maras, y H. B. Yurtseven, “Flexural Behavior of Laminated Wood Beams Strengthened with Novel Hybrid Composite Systems: An Experimental Study”, *J. Korean Wood Sci. Technol.*, vol. 51, núm. 6, pp. 526–541, 2023, doi: 10.5658/WOOD.2023.51.6.526.

[21] H. Younis, H. Al Abadi, V. I. Patel, y H. A. Naga, “Finite element analysis of fibre reinforced timber beams under flexural loading”, *Aust. J. Struct. Eng.*, pp. 1–21, doi: 10.1080/13287982.2024.2346955.

- [22] W. Wu, "Experimental Analysis of Bending Resistance of Bamboo Composite I-Shaped Beam", *J. Bridge Eng.*, vol. 19, núm. 4, p. 04013014, abr. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000557.
- [23] Z. Li, G. Yang, Q. Zhou, B. Shan, y Y. Xiao, "Bending performance of glulam beams made with different processes", *Adv. Struct. Eng.*, vol. 22, núm. 2, pp. 535–546, ene. 2019, doi: 10.1177/1369433218794327.
- [24] T. Ghanbari Ghazijahani, H. Jiao, y D. Holloway, "Composite Timber Beams Strengthened by Steel and CFRP", *J. Compos. Constr.*, vol. 21, núm. 1, p. 04016059, feb. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000714.
- [25] K. G. Kuder, R. Gupta, C. Harris-Jones, R. Hawksworth, S. Henderson, y J. Whitney, "Effect of PVC Stay-In-Place Formwork on Mechanical Performance of Concrete", *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 21, núm. 7, pp. 309–315, jul. 2009, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:7(309).
- [26] N. N. Gerges, C. A. Issa, N. J. Khalil, L. Abdul Khalek, S. Abdo, y Y. Abdulwahab, "Flexural capacity of eco-friendly reinforced concrete beams", *Sci. Rep.*, vol. 13, núm. 1, p. 20142, nov. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-47283-6.
- [27] Q. N. Abdullah y A. I. Abdulla, "Flexural behavior of hollow self compacted mortar ferrocement beam reinforced by GFRP bars", *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, p. e01556, dic. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01556.
- [28] U. Al-Fakher *et al.*, "Bending behaviour of precast concrete slab with externally flanged hollow FRP tubes", *Eng. Struct.*, vol. 241, p. 112433, ago. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112433.
- [29] J. Řepka, T. Vlach, J. Hájek, R. Fürst, J. Pošta, y P. Hájek, "Woven Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Tubular Mesh Reinforcement of Hollow High-Performance Concrete Beams", *Polymers*, vol. 15, núm. 14, Art. núm. 14, ene. 2023, doi: 10.3390/polym15143089.
- [30] S. S. C. Alharishawi, N. Rajaa, y A. R. Jabur, "Laboratory tests of solid and hollow concrete beams made with glass waste", *Arch. Civ. Eng. 2023 Vol 69 No 4 5-20*, 2023, Consultado: el 26 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/147644/edition/129754>
- [31] A. A. Abdulhameed *et al.*, "Experimental and environmental investigations of the impacts of wood sawdust on the performance of reinforced concrete composite beams", *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, p. e02550, dic. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02550.
- [32] "ASTM C143: Standard test method for slump of hydraulic-... - Google Académico". Consultado: el 27 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Standard+test+method+for+slump+of+hydraulic+cement+concrete&publication_year=2003#d=gs_cit&t=1722066726397&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3APK0URDJYkAJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26hl%3Des
- [33] A. M. Maglad, W. Mansour, S. Fayed, B. A. Tayeh, A. M. Yosri, y M. Hamad, "Experimental Study of the Flexural Behaviour of RC Beams Made of Eco-friendly Sawdust Concrete and Strengthened by a Wooden Plate", *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 17, núm. 1, p. 49, sep. 2023, doi: 10.1186/s40069-023-00617-0.
- [34] EPBS, «Sistema EPBS,» Querétaro, 2024. https://www.epbsmexico.com/reporte_tecnico.pdf

Propuesta metodológica para la aplicación de BIM en la Gestión de Activos Viales

Methodological proposal for the application of BIM in Road Asset Management.

Sánchez Olguín, Agustín. *Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México.*
Agustin.not10@gmail.com

Solorio Murillo, José Ricardo. *Instituto Mexicano del Transporte. San Fandila, México.*
rsolorio@imt.mx

Montoya Zamora, Ricardo. *Universidad Autónoma de Querétaro, México.*
Ricardo.montoya@uaq.mx

Palabras clave: BIM, gestión de activos, infraestructura vial, nivel de red, nivel de proyecto.

Resumen- La metodología BIM ha generado avances importantes en la construcción, y su aplicación en la gestión de infraestructura vial es de gran interés. La gestión de activos viales busca garantizar niveles de desempeño adecuados a lo largo del ciclo de vida de las carreteras. BIM, por su parte, abarca no solo el diseño y construcción de activos, sino también su operación, conservación y gestión de la información relacionada. El objetivo de este artículo es proponer un procedimiento metodológico que amplíe el uso de BIM en la gestión de activos viales, destacando los beneficios del flujo continuo de información y el acceso a una fuente común de datos. Se subraya la importancia de contar con información del activo tal como se construyó para planificar adecuadamente las labores de conservación y mejora. Además, se requiere de datos actualizados sobre el desempeño de las vías para facilitar el análisis de factibilidad y proyectos de rehabilitación o construcción.

Keywords: BIM, asset management, road infrastructure, network level, project level.

Abstract- BIM methodology has generated significant advances in construction, and its application in road infrastructure management is of great interest. Road asset management seeks to ensure adequate performance levels throughout the life cycle of roads. BIM, on the other hand, encompasses not only the design and construction of assets, but also their operation, maintenance and related information management. The aim of this article is to propose a methodological procedure that extends the use of BIM in road asset management, highlighting the benefits of continuous information flow and access to a common source of data. The importance of having information on the asset as built is underlined in order to properly plan maintenance and improvement works. In addition, up-to-date data on road performance is required to facilitate feasibility analysis and rehabilitation or construction projects.

1. Introducción

La gestión de activos es un proceso estratégico y sistemático de operación, mantenimiento, modernización y ampliación eficaz de los activos físicos en su ciclo de vida, centrado en prácticas organizacionales e ingeniería para la

asignación y utilización de recursos para optimizar el proceso de toma de decisiones. [1]

El proceso de gestión de un activo vial para conservar la infraestructura implica muchos datos, incluyendo datos geográficos, por lo que el acceso a esta información que constantemente se actualiza, presenta un desafío debido a la existencia de información en papel, bases de datos desactualizadas y la

necesidad de mantener registros vigentes de la infraestructura. [2]

Para abordar esta problemática, se destaca la utilidad de BIM como una herramienta de gestión de la información junto con el empleo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La metodología BIM (siglas de *Building Information Modeling* o *Modelización de Información para la Construcción*), de acuerdo con la Organización Internacional de Normalización, se refiere a una representación digital de las características físicas y funcionales de un activo, la cual concentra y da interoperabilidad a la información de todas las partes técnicas del proyecto para optimizar los procesos de la construcción a lo largo del ciclo de vida del activo. [3]

La integración de la metodología BIM en el proceso de la gestión de activos viales, podría resultar una mejora en la toma de decisiones que involucran la calidad de la infraestructura a lo largo del ciclo de vida del activo. En un sistema de gestión de activos el flujo continuo de la información es indispensable, y el uso de BIM como herramienta de gestión de la información constituye una alternativa viable.

Al lograr una concentración e interoperabilidad de la información a nivel de red de la infraestructura, se optimiza el sistema de gestión de activos para obtener un mayor beneficio económico de los activos carreteros y prolongar la vida útil de la infraestructura.

2. Aspectos generales de BIM

En el desarrollo y utilización de nuevas tecnologías en el sector transporte, se adaptaron distintos métodos en el sector de la construcción como BIM, pero existe confusión al implementarlo, ya que solo se percibe como la integración de un modelo 3D de una instalación con características y funciones añadidas. [4]

En realidad, el concepto de BIM comprende la colaboración de las partes interesadas en las distintas fases del ciclo de vida de una obra para insertar, extraer o actualizar la información, que utiliza estándares abiertos para facilitar la interoperabilidad de los datos. [5]

2.1 Dimensiones de BIM

La metodología BIM está compuesta a través de “dimensiones”, como complemento a los modelos geométricos tradicionalmente empleados, es decir, *CAD* (2D) y modelos digitales tridimensionales (3D). Las dimensiones que se han integrado son las siguientes: tiempo de ejecución y secuencia de actividades (4D), generación de costos y presupuestos durante el proyecto (5D), sustentabilidad del activo construido (6D) y la gestión del activo durante el ciclo de vida (7D). [6]

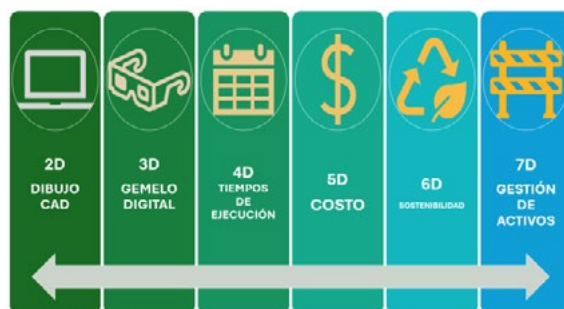


Figura 1. Las dimensiones de BIM

2.2 Nivel de madurez

El nivel de madurez en BIM permite evaluar la implementación de la presente metodología por parte de una organización. Las normas PAS 1192 definen cuatro niveles que indican el grado de adopción y eficiencia en la implementación de BIM (Figura 1): a) Nivel 0 o de baja colaboración, b) Nivel 1 o de colaboración parcial, c) Nivel 2 o de colaboración total y d) Nivel 3 o de integración total. [7]

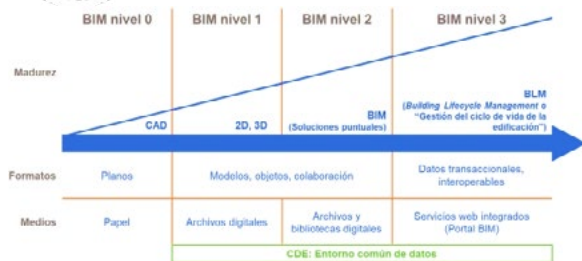


Figura 2. Niveles de madurez de BIM según la norma PAS 1192 (adaptada de [7])

2.3 Interoperabilidad de los datos

En el marco de la metodología BIM, la interoperabilidad de los datos se refiere a la transferencia fluida de información entre aplicaciones, permitiendo que distintas partes técnicas y aplicaciones contribuyan en conjunto al trabajo en cuestión; Este proceso, elimina la repetición de datos generados y facilita la automatización y fluidez del trabajo.

Uno de los principales modelos de datos de productos de construcción son las *Industry Foundation Classes* (IFC) desarrolladas y mantenidas por la organización internacional *buildingSMART*, las cuales tienen aplicación en la planificación, diseño, construcción y gestión de los activos. [8]

Así mismo, el Entorno Común de Datos (CDE) como lo define la norma ISO 19650, es un espacio compartido donde se almacenan, gestionan y comparten los datos relacionados con un proyecto de construcción utilizando la metodología BIM. Este espacio de trabajo permite que los distintos actores involucrados en el proyecto accedan y colaboren en tiempo real, asegurando la coherencia y la integridad de la información. [3]

2.4 Gemelos digitales

En la metodología BIM, un gemelo digital se refiere a la representación virtual precisa de los activos, procesos o sistemas para el control y la toma de decisiones. [9] En la infraestructura del transporte, se han adoptado gemelos digitales para gestionar la operación y

conservación de elementos como túneles, puentes y pavimentos. Estos modelos incorporan la geometría tridimensional de los componentes e información semántica detallada sobre materiales, funciones y relaciones. En el nivel de red de la gestión de infraestructura vial, estos modelos se fundamentan en el uso de herramientas SIG. [10]

3. Particularidades de los proyectos de infraestructura vial

Varios autores convergen en la observación de que la metodología BIM se ha centrado en proyectos verticales como edificaciones o proyectos arquitectónicos. A pesar de esta tendencia, el interés de su aplicabilidad en la infraestructura del transporte creció por los beneficios que ha proporcionado BIM en la industria de la construcción. [11] Sin embargo, la utilización de BIM en la infraestructura vial obliga a considerar ciertas particularidades con respecto a edificaciones.

3.1 Activos viales

La infraestructura vial la comprenden pavimentos, puentes, obras de drenaje, señalamiento y dispositivos de seguridad, entre otros. Estos pueden ser construidos en sitio como parte de proyectos específicos o, según sus características, ensamblados a partir de elementos prefabricados como barreras de seguridad o gaviones, entre otros. En todo proyecto de carreteras, es crucial garantizar la armonización y mantenimiento adecuado del conjunto de estos activos. [12]

En relación con los pavimentos, porque es el activo principal en la gestión de activos viales y el activo centrado en este estudio, destaca que presentan una variabilidad significativa en elementos de diseño. [13]

3.2 Ciclo de vida de las carreteras

Como se ha mencionado previamente, la conexión entre BIM y la gestión de activos se centra en el ciclo de vida de la infraestructura, abarcando la planeación, diseño, construcción, operación/conservación y demolición del activo.

La norma ISO 19650, en relación con la metodología de BIM, aplica para todos los que intervienen en los distintos procesos de gestión de la información a lo largo del ciclo de vida de un activo (Figura 3). La gestión de la información abarca dos fases: la fase de suministro y la fase de operación. [15]

La fase de suministro abarca la planeación, diseño y construcción de la infraestructura vial. La fase de operación se inicia después de abrir la infraestructura al tránsito, involucrando la supervisión continua del estado físico y las condiciones de operación de los tramos. Esto se realiza mediante el uso de niveles de desempeño, junto con la planificación y ejecución de trabajos de conservación de la infraestructura por parte de las organizaciones responsables.



Figura 3. Gestión de la información a lo largo del ciclo de vida del activo

Es importante señalar que, en la fase de Operación y Conservación del activo, si es necesario reconstruir o modernizar la infraestructura existente, se debe incorporar un subproceso adicional en el ciclo de vida. Este subproceso también abarca la planificación y ejecución de la conservación rutinaria y preventiva de la infraestructura, concluyendo al llegar al fin de la vida útil del activo o al construir uno nuevo.

Así mismo, se establece la importancia del flujo de información (Figura 4) y la disminución de la pérdida de información durante el ciclo de vida del proyecto por las

distintas partes interesadas del mismo. En trabajos previos, se ha señalado el hecho de que la mayor pérdida de información se presenta entre las fases de suministro y la fase de operación del proyecto.

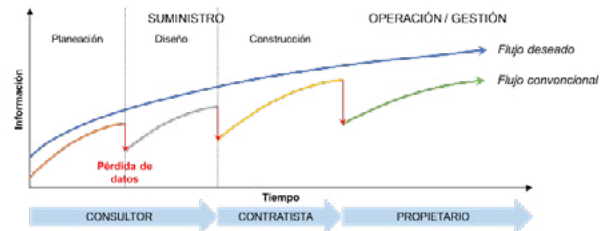


Figura 4. Pérdida de información durante el ciclo de vida de un activo. [13]

3.3 Nivel de proyecto y de red

Dentro de los objetivos fundamentales del proceso de gestión de activos, se busca identificar y abordar las necesidades de conservación, mejora y expansión del conjunto de tramos viales gestionados por una organización en un periodo específico. Este proceso se desarrolla en dos niveles: a nivel de proyecto y a nivel de red. [14]

A nivel de proyecto, se centra en tramos específicos con un diagnóstico detallado de la situación actual, la elaboración de un proyecto ejecutivo acorde al programa de obra, la ejecución de las obras y el seguimiento según el mismo programa.

A nivel de red, implica un análisis integral de las deficiencias de desempeño en los tramos de interés y la asignación eficiente de recursos para corregirlas. Se emplean procedimientos de optimización que consideran la contribución de cada tramo al logro de los objetivos organizacionales. Este análisis genera una lista de proyectos candidatos con sus respectivos montos de inversión y un cronograma de intervención (un programa de obra).

4. Propuesta de aplicación de BIM en la gestión de activos viales

La metodología BIM constituye una alternativa viable para mejorar la calidad de la infraestructura y la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida de un activo. En un sistema de gestión de activos el flujo continuo de los datos del activo a través del tiempo es indispensable, y el uso de BIM como una herramienta de gestión de la información constituye una posible solución. [15] Al lograr la concentración e interoperabilidad de la información a nivel de red de la infraestructura, se optimiza el sistema de gestión de activos para obtener un mayor beneficio económico de los activos carreteros y prolongar la vida útil de la infraestructura. Al mismo tiempo, se maximiza la confiabilidad e integridad de los datos.

4.1 Propuesta metodológica

En esta sección se presenta la propuesta metodológica en la que se centra la fase actual del proyecto de investigación. La propuesta comprende cinco pasos que: en primera instancia, abordan la evaluación de los activos y la recopilación de información sobre su estado actual y, más adelante, se enfocan en la integración de BIM a nivel de proyecto y de red, asegurando una interconexión efectiva.

1. Descripción de la información involucrada en la gestión vial

Se debe realizar la identificación del activo y realizar una breve descripción de las diferentes categorías de información involucrada en el proyecto (planeación, programación, construcción, operación y conservación del activo) . Esta debe ser agrupada a nivel de proyecto y red (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de la información a nivel de red y de proyecto.

Nivel de Proyecto	Nivel de Red
<i>Localización</i>	<i>Metas de desempeño</i>
<i>Estado del Activo</i>	<i>Inventario</i>
<i>Tránsito</i>	<i>Mediciones del estado físico</i>
<i>Parámetros climáticos</i>	<i>Tránsito</i>
<i>Historial de intervenciones</i>	<i>Información climatológica</i>
<i>Empresas consultoras</i>	<i>Historial de intervenciones</i>
<i>Alternativas de proyecto</i>	<i>Indicadores de desempeño</i>
<i>Empresas proyectistas</i>	<i>Resultados de análisis de ciclo de vida</i>
<i>Datos de proyecto: Diseño Geométrico</i>	<i>Presupuestos</i>
<i>Datos de proyecto: Diseño Estructural</i>	<i>Proyectos candidatos</i>
<i>Indicadores de rentabilidad</i>	<i>Programa de obra plurianuales</i>
<i>Empresas constructoras y supervisoras</i>	<i>Contratos</i>
<i>Contratos</i>	-

2. Diseño e integración de la base de datos

Este inciso, se refiere al diseño simplificado de un modelo relacional de bases de datos para almacenar la información de la red carretera seleccionada mediante los estándares de interoperabilidad mencionados. En el diseño se deberán de contemplar los siguientes objetos:

- Base de datos necesarias para identificar de manera única los tramos de la red.
- Base de datos para almacenar la información en distintas categorías relacionadas a los niveles de gestión (proyecto y red).
- Relaciones entre las bases de datos.
- Esquemas de interoperabilidad de los datos.

3. Formulación del procedimiento de aplicación de BIM

En este segmento se enfoca específicamente en la incorporación del procedimiento de

aplicación de BIM en relación con el objetivo general de la presente investigación. Con esta sección, se busca proporcionar lo siguiente:

- Implementar la metodología BIM a mediano plazo como parte de las herramientas disponibles para la gestión de activos
- Identificar las partes interesadas involucradas de una u otra manera en actividades relacionadas con la gestión de activos a cargo de una organización
- Descripción de los actuales procesos institucionales y definición de mecanismos para su migración gradual al entorno de BIM
- Resaltar la importancia de la interoperabilidad de la información en la aplicación de BIM, en lo referente a aspectos normativos y la implementación de un CDE.
- Configurar e implementar una plataforma sostenible de tecnologías de la información como apoyo al proceso de implementación de BIM, de acuerdo con la naturaleza, objetivos y capacidad financiera de cada organización
- Definir las características de los gemelos digitales apropiados para la gestión de activos en los niveles de proyecto y de red.

4. Desarrollo del gemelo digital a nivel de proyecto

Esta fase, se refiere al desarrollo de un gemelo digital de un tramo de carretera a nivel de proyecto. El objetivo es dar cobertura al conjunto de actividades relacionadas con el suministro del activo, abarcando desde el anteproyecto y la construcción hasta otras vinculadas a la fase de operación, como el seguimiento/diagnóstico del desempeño o el registro de actividades de mantenimiento preventivo. Es crucial destacar que el gemelo digital previsto en este punto comparte similitudes con los utilizados en el suministro de obras de edificación en el contexto de BIM.

5. Desarrollo de un modelo digital a nivel de red

Desarrollar un estudio piloto adicional para la creación de un modelo digital restringido destinado a representar una red de carreteras. La restricción del modelo se deriva de la extensa cantidad de información que puede asociarse a las redes. Debe contemplarse la incorporación de indicadores de desempeño a este modelo. En el caso de los pavimentos, al ser el principal activo, se podrá integrar datos como el *Índice de Regularidad Internacional (IRI)* [10]. Asimismo, se debe considerar el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica integradas en BIM.

Una vez completado lo anterior, se procederá con la aplicación de procesos de gestión, permitiendo el desarrollo de una estrategia financiera específica para la conservación del activo. Esta estrategia se fundamenta en un análisis de factibilidad económica que contempla los costos asociados a la conservación y mantenimiento de la infraestructura vial a lo largo de su ciclo de vida. En este proceso, se puede emplear herramientas de gestión de pavimentos, como es el software *HDM-4*.

5. Resultados y discusión

5.1 Descripción de la información involucrada en la gestión vial

Se debe enfatizar que para que exista una implementación exitosa entre BIM y la gestión de activos dependerá principalmente del objetivo y enfoque que presente la organización propietaria del activo. Donde el nivel de madurez del proceso de gestión de activos cobra importancia para su implementación de BIM. Este a su vez se verá reflejado en el nivel de madurez en BIM.

5.2 Diseño e integración de la base de datos

Para que se pueda implementar un proyecto en BIM y la gestión de activos, el nivel de la información a nivel de red y proyecto en el proceso de gestión de activos deberá ser nivel 3 en BIM. Esto garantizará de manera efectiva la concentración y el flujo de información del activo. Donde se debe considerar la capacitación y asignar roles de trabajo de acuerdo con BIM. Esta asignación de tareas es indispensable para el trabajo eficiente de BIM durante el tiempo de vida útil del proyecto.

5.3 Formulación del procedimiento de aplicación de BIM

Enfatizar la importancia del ECD y el proceso de gestión de pavimentos, donde se señale que la pieza fundamental es la concentración y la interoperabilidad de la información. El tener un ECD es de importancia debido a que se permite realizar una concentración del historial del activo desde la concepción del proyecto y hasta el fin del ciclo de vida útil del activo (Figura 5).

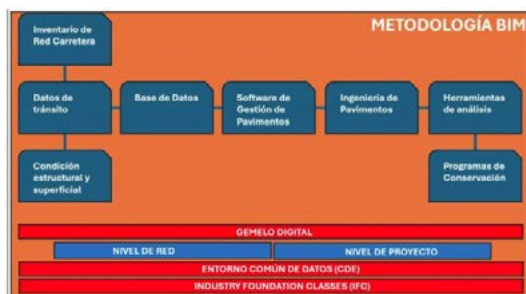


Figura 5. Formulación del procedimiento de aplicación de BIM en la gestión de activos pavimentos.

5.4 Desarrollo del gemelo digital a nivel de proyecto

Aunque la metodología BIM ofrece un marco para conectar todas las fases del ciclo de vida de un activo, su implementación se encuentra mayoritariamente restringida a la etapa de diseño y al nivel de proyecto. Por lo que la consideración de modelos digitales solo son útiles en el nivel de proyecto, mientras que a nivel de red, la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es suficiente.

5.5 Desarrollo de un modelo digital a nivel de red

En la fase de operación, la herramienta computacional HDM-4 de la PIARC se ha destacado por su utilidad en la gestión de pavimentos. No obstante, su falta de actualización reciente limita a las organizaciones viales en cuanto a lograr la interoperabilidad de la información, como se ha mencionado. En consecuencia, se pueden proponer diversos casos de estudio que exploren la integración de varias herramientas de gestión de activos, con el objetivo de facilitar la interoperabilidad de la información, tal como se pretende abordar en la presente propuesta de investigación en relación con BIM.

Así mismo tiempo, como se ha comentado previamente, la gestión y conservación de infraestructura vial requiere datos detallados sobre intervenciones y el estado actual de los activos. En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son cruciales para el manejo eficiente de esta información. Es relevante destacar la sinergia entre la metodología BIM y los SIG, que fortalece la integración de datos tridimensionales y geoespaciales y mejora la toma de decisiones en la gestión de infraestructura vial.

6. Conclusiones

En conclusión, la integración de la metodología BIM en la gestión de activos viales presenta una posible solución viable para optimizar el ciclo de vida de la infraestructura vial. Al centralizar la información y mejorar la interoperabilidad entre las distintas fases de los proyectos, BIM no solo permite una toma de decisiones más eficiente, sino que también prolonga la vida útil de los activos. La creación de gemelos digitales y la incorporación de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) refuerzan esta integración, aportando

una mayor precisión en la gestión y conservación de los activos. Si bien BIM se ha implementado principalmente en la fase de diseño, su aplicación en la operación y mantenimiento de la infraestructura vial ofrece un gran potencial para su desarrollo. Finalmente, para lograr una implementación exitosa de esta metodología requerirá un compromiso institucional para avanzar hacia un nivel de madurez adecuado, capacitar al personal y definir roles clave en la gestión de la información a lo largo de todo el ciclo de vida del activo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado para la realización de los estudios de posgrado y al Instituto Mexicano del Transporte por la información brindada para el presente artículo.

Referencias

- [1] AASHTO TAM Guide – AASHTO Transportation Asset Management Guide Volume III. (2020). <https://www.tamguide.com/>
- [2] J. Carneiro, R. J. F. Rossetti, D. C. Silva and E. C. Oliveira, "BIM, GIS, IoT, and AR/VR Integration for Smart Maintenance and Management of Road Networks: a Review," 2018 *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Kansas City, MO, USA, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/ISC2.2018.8656978
- [3] ISO 19650-1 (2018). Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles. International Organization for Standardization.
- [4] Costin, A., Adibfar, A., Hu, H., & Chen, S. S. (2018). Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*, 94, 257–281. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>
- [5] Welcome to the National BIM Standard - United States | National BIM Standard - United States. (s. f.). <https://www.nationalbimstandard.org/>
- [6] ACCA Software, «The dimensions of BIM – 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, 10D BIM explained.» 2018. <https://biblus.accasoftware.com/en/bim-dimensions/>.
- [7] ACCA Software, «BIM maturity Levels: from stage 0 to stage 3.» ACCA Software, 2019. <https://biblus.accasoftware.com/en/bim-maturity-levels-from-stage-0-to-stage-3/>.
- [8] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. John Wiley & Sons.
- [9] Royal HaskoningDHV, «Digital twins: where physical meets digital.» Royal HaskoningDHV, s.f. <https://www.royalhaskoningdhv.com/en/challenges/digital-transformation/digital-twins>.
- [10] Consilvio, A., Hernández, J. S., Chen, W., Brilakis, I., Bartoccini, L., Di Gennaro, F., & Van Welie, M. (2023). Towards a digital twin-based intelligent decision support for road maintenance. *Transportation Research Procedia*, 69, 791–798. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.237>
- [11] Chong, H., Lopez, R., Wang, J., Wang, X., & Zhao, Z. (2016). Comparative analysis on the adoption and use of BIM in road infrastructure projects. *Journal of Management in Engineering*, 32(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000460](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000460)
- [12] Solorio Murillo J. R., Sánchez Olguín A., Mendoza Sánchez, J. F., "Aspectos de la Aplicación de BIM en Proyectos de Infraestructura Vial", *XII Congreso Mexicano del Asfalto*, Cancún, México, 2018.
- [13] Haas, R., & Hudson, W. R. (2015). Pavement Asset Management. John Wiley & Sons.
- [14] Solorio Murillo, J. R. (2023). La Gestión de Activos como prerrequisito para la aplicación de BIM en gestión de carreteras. Instituto Mexicano del Transporte. NOTAS núm. 201, artículo 2. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=574&IdBoletin=202>
- [15] Fang, Z., Liu, Y., Lu, Q., Pitt, M., Hanna, S., & Tian, Z. (2022). BIM-integrated Portfolio-based Strategic Asset Data Quality Management. *Automation in Construction*, 134, 104070. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104070>

Simulación de microplásticos inmersos en agua dentro de un circuito Lab-On-a-Chip

Water immerse microplastics simulation in a Lab-On-a-Chip circuit

¹Alejandro Rojas Agustin, ¹ Christopher René Torres-San Miguel

¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Zacatenco, 07738, CDMX.
Ciudad de México, México
ctorress@ipn.mx

Palabras clave: Microplásticos, microfluídica, LOC, SolidWorks®, CDF, simulación

Resumen- En los últimos años los microplásticos han tomado gran relevancia, detectar su presencia en agua se vuelve un indispensable. El presente trabajo muestra la simulación de microplásticos de PVC inmersos en agua donde se observa el comportamiento dentro de un Lab-On-a-Chip (LOC), con dinámica de fluidos computacional (CFD). Se obtuvo el perfil de velocidad del fluido con una velocidad máxima que converge en $0.00117553492 \text{ m/s}$, se determinó el régimen al que fluye el agua dentro del LOC, $Re = 1.644$, las partículas de PVC tienden a permanecer en suspensión ya que se sedimentan a una velocidad de $5.913 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ que es mucho menor a la velocidad del fluido y tienden a seguir un patrón de movimiento similar al del fluido, se encontró que el dispositivo LOC puede ser usado como dispositivo de medición.

Keywords: Microplastics, microfluidic, LOC, SolidWorks®, CFD, simulation

Abstract- Microplastics have taken, in lately years a great relevance, detect its presence in water becomes essential. An immerse PVC microplastics water simulation is presented at this work, where its behavior in a Lab-On-a-Chip (LOC) was observed, with Computational Fluid Dynamics (CFD). A speed profile was obtained with a maximum velocity converging to $0.00117553492 \text{ m/s}$ the regime at which the water flows inside the LOC was determined $Re = 1.644$, PVC particles tend to remain in suspension as they settle at a velocity of $5.913 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ which is much lower than the fluid velocity and keep the fluid pattern of motion, it was found that the LOC device might be use as a sensor of microplastics

1. Introducción

Los microplásticos, de acuerdo con [1], son partículas plásticas de tamaño $< 5 \text{ mm}$ y $> 100 \text{ nm}$, desprendidas de plásticos de mayor dimensión, provocando amenaza para el ser humano. A pesar de que la contaminación por microplásticos se ha reportado mayormente en aguas marinas, ha llamado la atención por su presencia en agua de consumo humano [2].

La microfluídica aborda el análisis y manipulación de fluidos en sistemas de escala micrométrica, los efectos dominantes incluyen el flujo laminar, difusión y tensión superficial. Basados en la tecnología que proporciona la microfluídica, los Lab-On-a-Chip, (LOC) son dispositivos que permiten la integración de varios componentes en un solo dispositivo [3], se logran estudios de laboratorio, así como

sensores que permiten trabajar con cantidades de muestras pequeñas y el tiempo de respuesta es inmediato, mejorando el rendimiento en sistemas de detección [4].

El CFD es la ciencia de la predicción de flujo de fluidos y fenómenos relacionados, esto mediante la resolución de ecuaciones matemáticas de gobierno, utilizando un proceso numérico [5]. El CFD como herramienta se puede utilizar para calibrar ciertas mediciones, es complementaria, rentable y poderosa para las mediciones de flujo de agua en geometrías simples [6]. En cuanto a la implementación de simulación CFD para dispositivos LOC, el trabajo presentado por [7] observaron que, el comportamiento de las partículas en su dispositivo microfluídico fue bastante similar tanto en el modelo numérico como experimental, no encontraron diferencias significativas, con la validación realizada pudieron predecir y evaluar con precisión el flujo de fluido, haciendo uso de herramientas CDF.

El trabajo de [8], la simulación CFD de fluidos newtonianos y no newtonianos en dispositivos microfluídicos donde toman la importancia de ciertas incertidumbres en geometría, malla, analíticas o sistemáticas, [9] por su parte muestra la similitud de sus simulaciones con los datos experimentales en el comportamiento de fluido y el impacto del caudal en el patrón de flujo. El método que presenta [10] propone un método de abstracción para simulaciones CFD reduciendo el tiempo de simulación crucial en un diseño rápido que se optimiza para dispositivos microfluídicos como los LOC, logrando un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

El análisis del comportamiento de los microplásticos esparcidos en agua de consumo humano, ha generado gran impacto en

diferentes investigaciones, una forma de analizar y predecir el actuar de los microplásticos en agua es mediante simulación con esto el objetivo de este trabajo es el análisis CDF de un dispositivo LOC, para observar no solo el comportamiento del agua sino de comprender más a detalle el patrón de flujo de microplásticos de PVC, fluyendo en un LOC, se espera que la velocidad y demás parámetros de fluido con microplásticos, varíen para encontrar el mejor diseño y ubicación para un sensor, para usar el LOC como un dispositivo de medición en el que tanto el fluido como las partículas en él, se comporten de acuerdo a un régimen laminar.

2. Materiales y metodología

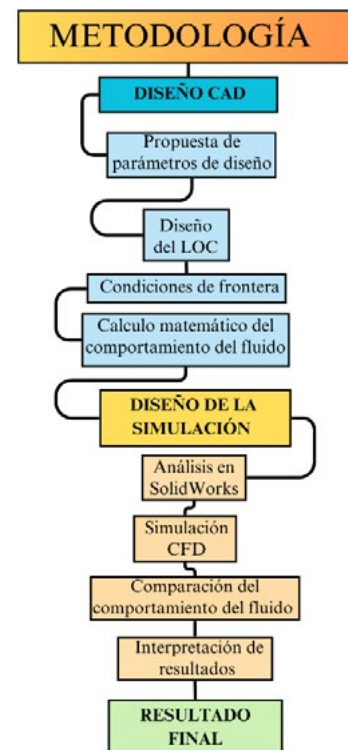


Figura 1.- Metodología empleada

Para la realización de la simulación, se diseñó la metodología mostrada en la Figura 1, se detalla el procedimiento a seguir a manera de diagrama de flujo, partiendo del diseño CAD del circuito LOC, acotando condiciones de

frontera y realizando el cálculo matemático para poder pasar a la simulación CFD y finalmente el análisis del comportamiento del fluido y los microplásticos en el LOC.

2.1. Diseño CAD

El CAD del dispositivo LOC se realizó haciendo uso de la herramienta de cómputo SolidWorks es su versión 2024. Se consideró un tamaño de canal de 0.0015 m con una geometría cuadrada, que permite un mayor paso de fluido a diferencia de una geometría circular, logrando un mayor campo de visualización, así como un mejor análisis, también por sus paredes planas, permite una mejor colocación de sensores y mayor practicidad en su fabricación, de acuerdo con [11], una sección de canal cuadrada/rectangular permite un flujo con comportamiento constante. En cuanto a las dimensiones y geometría del circuito del LOC, en la Figura 2, se muestra el diseño, donde se consideró un circuito simple de línea recta, con entrada y salida a los extremos del dispositivo, teniendo una altura de 0.01 m , un largo de 0.06 m y un ancho de 0.02 m

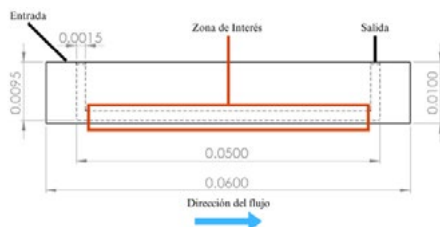


Figura 2.- Vista lateral con cotas en metros del LOC

2.2. Condiciones de frontera

Tanto para el análisis matemático como en la simulación se consideró la zona de interés del circuito, que es la sección horizontal del canal (zona de detección) del LOC, debido a que es donde se pretende implementar la detección de microplásticos.

Para lograr flujo laminar se debe mantener en el interior del circuito, un número de Reynolds $Re < 2000$ [7], de acuerdo con la ecuación (1)

$$Re = \frac{v(4R)\rho}{\mu} \quad (1)$$

Donde R es el radio hidráulico, ρ la densidad, μ la viscosidad dinámica y v la velocidad del fluido.

A la salida del circuito se encuentra la presión atmosférica de CDMX de 77570 Pa , y una temperatura ambiente promedio de 293.16 K , para las propiedades del agua se tomaron los valores siguientes: $\rho = 998.16\text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.0010014\text{ Pa}\cdot\text{s}$, el lado del canal es $h = 0.0015\text{ m}$, el largo del canal $l = 0.05\text{ m}$, se consideró un flujo laminar completamente desarrollado y estable, en la Figura 3, se muestra el marco de referencia para el LOC.

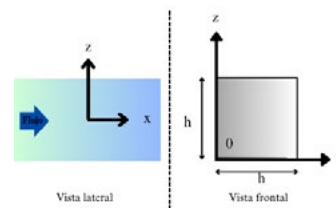


Figura 3.- Marco de referencia del canal

2.3. Cálculo matemático del movimiento del fluido dentro del LOC

Para corroborar el comportamiento del flujo, se utilizan las siguientes ecuaciones fundamentales para flujos completamente desarrollados, con flujo laminar en fluidos incompresibles [7], [11]. De la ecuación Navier-Stokes se tiene la Ecuación de conservación de masa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Para este trabajo $v = w = 0$, $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

Esto corresponde a un flujo completamente desarrollado. Para obtener la ecuación que describe el flujo, se emplea la ecuación de momento lineal para flujo incompresible y propiedades constantes, se tiene la ecuación de Navier-Stokes en forma reducida [11].

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (3)$$

Donde $\vec{v}$ es el vector velocidad, P es la presión y $\vec{g}$ es el vector gravedad.

Para el movimiento del fluido en x se obtiene integrando y despejando u , la ecuación de movimiento (4) que define el perfil de velocidad con respecto a una altura en z .

$$u(z) = \frac{1}{2\mu} \frac{\Delta P}{l} (z^2 - hz) \quad (4)$$

Para calcular el flujo volumétrico se integra el perfil de velocidad multiplicado por un diferencial de área de la siguiente forma:

$$\dot{V} = \int \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (5)$$

Evalando y simplificando

$$\dot{V} = \frac{\Delta P h^4}{12\mu l} \quad (6)$$

El cálculo de la velocidad de sedimentación de la partícula esta dado por la ecuación (6)

$$v_s = \frac{D^2(\rho_{particula} - \rho_{agua})g}{18\mu} \quad (7)$$

Si $v_s < u(z)$ las partículas quedaran suspendidas y seguirán el patrón de velocidad del fluido.

2.4. Desarrollo de la simulación

Para llegar a los resultados, de acuerdo con el cálculo analítico, se plantea la ejecución de una simulación del flujo de agua en SolidWorks, para comparar los resultados obtenidos, la simulación ayudara a predecir el comportamiento del fluido. Con el programa SolidWorks, se usó el complemento Flow Simulation, para hacer fluir agua dentro del circuito. En cuanto a los parámetros de simulación, se tomaron las mismas consideraciones de condiciones de frontera planteadas en el cálculo matemático, teniendo a la entrada del circuito un flujo volumétrico, a la salida presión atmosférica, con un dominio computacional 3D, las paredes del dispositivo se tomaron como Real Wall, con un ajuste manual de malla y número de elementos en "x" de 74, en "y" de 2 y en "z" de 14, manteniendo una relación de aspecto con un total de 2072 elementos.

SolidWorks en su módulo de CFD, Flow Simulation soluciona mediante el método de Volúmenes Finitos las ecuaciones de Navier-Stokes, teniendo como incógnita los nodos vecinos de cada volumen de control En cuanto a la simulación de partículas, SolidWorks permite la inyección de elementos dentro de la misma simulación, teniendo como limitación, la interacción entre partículas y el fluido, debido a el uso de CFD. Permite un análisis simple de partículas dentro del circuito LOC, las condiciones de frontera para las partículas de PVC que se usaran en la simulación son:

- Tamaño de partícula $D = 6 \times 10^{-6} \text{ m}$
- Densidad del PVC 1379 kg/m^3

3. Resultados y discusión

Una vez obtenidas las ecuaciones del perfil de velocidad y flujo volumétrico, sustituyendo los valores propuestos en las condiciones de frontera obtenemos de la ecuación (4) y (6), con un diferencial de presión $\Delta P = 0.1922688 \text{ Pa}$

$$V_{\text{máx}} = 0.0013 \text{ m/s}$$

$$Q = 1.35 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Re = 1.644$$

Haciendo uso de la herramienta de cómputo Excel en su versión 2410, se evalúa la ecuación (4) para los valores de z igual a cero, hasta z igual a h y se obtiene el perfil de velocidad esperado dentro del circuito LOC como se muestra en la Figura 4.

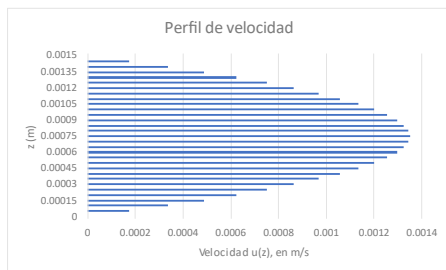


Figura 4.- Perfil de velocidad del fluido dentro del LOC

Al ejecutar la simulación, finaliza con 246 iteraciones. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5, fue posible analizar la distribución de fluido dentro del micro canal utilizando un gráfico de corte de sección con un flujo completamente desarrollado y un perfil de velocidad en la sección de interés cercano a los valores obtenidos previamente en el cálculo analítico, la velocidad máxima obtenida en la simulación tras 62 iteraciones es de 0.0011 m/s , a medida que se acerca a las paredes el perfil de velocidad muestra una

reducción en la velocidad hasta alcanzar el cero en las paredes del canal.



Figura 5.- Perfil de velocidad del fluido

Para verificar el resultado obtenido se realizó un análisis de sensibilidad de malla, hasta alcanzar una cantidad de elementos $> 8 \times 10^9$ elementos como se muestra en la Figura 6. El resultado converge en $0.00117553492 \text{ m/s}$. Las partículas al ir llenando el canal y conforme entraran en el circuito, a medida que recorren la zona de interés, las partículas comienzan a sedimentarse y perder velocidad, se logra observar que al final del recorrido de la zona de interés es donde se concentra un mayor parte de partículas sedimentadas.

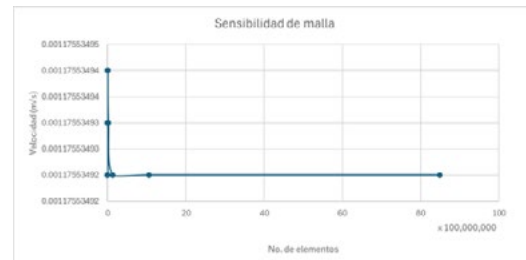


Figura 6. Análisis de sensibilidad de malla

Las líneas de flujo que siguen las partículas en la simulación presentan un patrón de velocidad similar al del fluido Figura 7, evaluando la ecuación (7) se obtiene un valor de $5.913 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, que es menor a la velocidad máxima del fluido. En la Figura 8, se observa que las partículas tienden permanecer en su mayoría en suspensión en la zona de interés por el tiempo suficiente para realizar una medición.

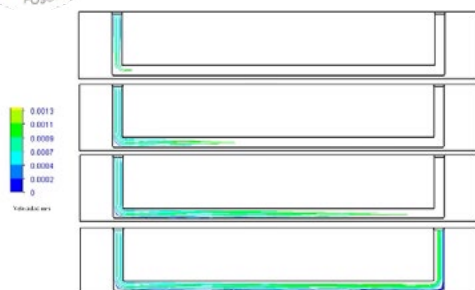


Figura 7.- Recorrido de partículas por el LOC

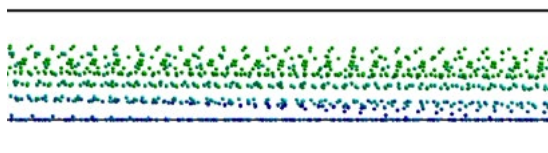


Figura 8.- Partículas en la zona de interés

Al realizar el análisis tanto del cálculo analítico como de la simulación se encontró una diferencia en los resultados con una variación de 2 diez milésimas, la evidencia muestra que el comportamiento del fluido es muy similar en ambos casos y la discrepancia en los valores puede deberse a los criterios tomados tanto para el cálculo analítico como en la simulación.

3.1. Conclusión

La geometría del circuito propuesto mostro un comportamiento de fluido laminar óptimo para su funcionamiento como sensor, ya que al implementar un sistema en la zona de interés y ubicando la mayor concentración de partículas se podrá detectar plásticos, a pesar de la certeza en los valores logrados, es necesaria la realización de experimentos para validar los resultados obtenidos. El resultado obtenido con el uso del módulo CFD, para este problema es lo suficientemente bueno, ya que se trabajó con una geometría sencilla y el interés en este estudio fue mayormente dirigido al comportamiento fluido-estructura, así como de los efectos físicos principales, a pesar de que mediante CFD no se puede hacer

un análisis exhaustivo de las partículas, el módulo de Flow Simulation te da un acercamiento lo suficiente preciso, tomando en consideración los altos costos computacionales implícitos en simulaciones de alta fidelidad de dispositivos microfluídicos en software de multi-física, se observó que se pueden emplear modelos compactos CDF para el análisis de efectos simples que ayudan a la mejora en cuanto al diseño de un dispositivo. En trabajos a futuro se proponer realizar la validación experimental de los valores obtenidos e implementar un sistema de detección.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) y al Instituto Politécnico Nacional.

Referencias

- [1] C. Bollaín y D. Vicente, "Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública", *Revista Española de Salud Pública*, vol. 93, pp. 1-10, Aug. 2019.
- [2] S. S. Celi, D. S. Andrade, S. J. Loza y Bermeo-Sierra T. I. Bermeo, "Microplásticos, un problema de salud pública emergente," *Revista Información Científica*, vol. 102, no. 4261, Jul. 2023.
- [3] J. Zhuang, J. Yin, S. Lv, B. Wang, and Y. Mu, "Advanced 'lab-on-a-chip' to detect viruses – Current challenges and future perspectives," *Biosens Bioelectron*, vol. 163, p. 112291, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.BIOS.2020.112291.
- [4] S. Preetam et al., "Emergence of microfluidics for next generation biomedical devices," *Biosens Bioelectron X*, vol. 10, p. 100106, May 2022, doi: 10.1016/J.BIOSX.2022.100106.
- [5] H. Ma, L. Zhou, Z. Liu, M. Chen, X. Xia, and Y. Zhao, "A review of recent development for the CFD-DEM investigations of non-spherical particles," *Powder Technol*, vol. 412, p. 117972, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.POWTEC.2022.117972.
- [6] R. Shen, Z. Jiao, T. Parker, Y. Sun, and Q. Wang, "Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review," *J Loss Prev Process*

- Ind, vol. 67, p. 104252, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.JLP.2020.104252.
- [7] V. Carvalho et al., “Numerical evaluation and experimental validation of fluid flow behavior within an organ-on-a-chip model,” *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 243, p. 107883, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.CMPB.2023.107883.
- [8] B. F. García, M. Mousaviraad, and S. Saraji, “Verification and validation for microfluidic CFD simulations of Newtonian and non-Newtonian flows,” *Appl Math Model*, vol. 107, pp. 557–573, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.APM.2022.02.019.
- [9] Y. Amini et al., “Computational fluid dynamics simulation of two-phase flow patterns in a serpentine microfluidic device,” *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-36672-6.
- [10] M. Takken and R. Wille, “Accelerated Computational Fluid Dynamics Simulations of Microfluidic Devices by Exploiting Higher Levels of Abstraction,” *Micromachines (Basel)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/mi15010129.
- [11] F. Pisapia, W. Balachandran, and M. Rasekh, “Organ-on-a-Chip: Design and Simulation of Various Microfluidic Channel Geometries for the Influence of Fluid Dynamic Parameters,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 8, Apr. 2022, doi: 10.3390/app12083829

Caracterización de los refuerzos en el tapial para muros (RE): Revisión sistemática

Characterization of reinforcements in rammed earth walls (RE): Systematic review

Autores:

Reyes Barragán Aminta, López Lara Teresa, Medellín Aguilar Gerardo y Moisés Horta Jaime.

Universidad Autónoma de Querétaro – Facultad de Ingeniería

Santiago de Querétaro, Querétaro México

Amintareyes571@gmail.com

Palabras clave: tierra apisonada, tapial, refuerzos, estabilizantes, polímeros, fibras naturales, compactación.

Resumen

El reforzamiento de la tierra apisonada estabilizada (SER) es primordial dependiendo de la ubicación de la construcción del sistema, si no se toma en cuenta, puede generar una serie de problemas en los que se presentan fallas estructurales, a causa de agregados de reforzamiento, presencia de sismos en la zona y deficiencias del método aplicado. El presente estudio analiza los tipos de métodos que involucran un refuerzo en la construcción del tapial, comparando parámetros de sustentabilidad del material, impacto económico, social y tecnológico. Demostrando como afectan y benefician las fibras naturales, los refuerzos de acero y aglutinantes industriales, siendo los principales refuerzos en esta investigación. Todo ello con la intención de demostrar el comportamiento de los sistemas constructivos predominantes en el tapial, recopilando información de los distintos sistemas del tapial que se puedan construir dependiendo los materiales que se tienen en la región, contribuyendo así a la meta 11n.1 de la agenda 2030 con sistemas constructivos más económicos y sostenibles al alcance de habitantes de bajos recursos.

Keywords: rammed earth, rammed earth, reinforcements, stabilizers, polymers, natural fibers, compaction.

Abstract

The reinforcement of stabilized rammed earth (SER) is essential depending on the location of the construction of the system. If it is not taken into account, it can generate a series of problems in which structural failures occur, due to reinforcement aggregates, the presence of earthquakes in the area and deficiencies of the applied method. The present study analyzes the types of methods that involve reinforcement in the construction of rammed earth, comparing sustainability parameters of the material, economic, social and technological impact. Demonstrating how natural fibers, steel reinforcements and industrial binders affect and benefit, being the main reinforcements in this research. All this with the intention of demonstrating the behavior of the predominant construction systems in rammed earth, collecting information on the different rammed earth systems that can be built depending on the materials available in the region, thus contributing to goal 11n.1 of the 2030 agenda with more economical and sustainable construction systems within reach of low-income inhabitants.

1. Introducción

El tapial es un método de construcción sostenible también llamado tierra apisonada. La tradicional tierra apisonada (RE) es una construcción monolítica in situ que utiliza mezclas de tierra locales compactadas en un marco temporal, que se remonta al año 7500 a.C. [1]. Las ventajas más importantes de esta tecnología son el bajo impacto de fabricación y la alta durabilidad estructural. Los materiales de tierra apisonada consisten principalmente en gravas, arena, arcilla y agua, comprimidos entre sí entre encofrados para obtener una masa sólida que se deja secar [2]. Se estima que al menos el 30% de la población mundial vive en algún tipo de construcción de tierra [3].

Debido a las existencias de materiales económicos y fácilmente disponibles, ya que puede ser un método simple, los métodos de construcción de energías renovables siguen utilizándose ampliamente en todo el mundo en desarrollo; siendo un sistema inconsistente de los códigos de construcción y la práctica común de técnicas de construcciones populares en estas áreas resultan ser condiciones no favorables [4].

Hoy en día, la conciencia de la necesidad de reducir el impacto ambiental, apoyada por las políticas actuales de desarrollo sostenible, está animando a la industria de la construcción a avanzar hacia el uso de materiales vernáculos. De ellos, la tierra, especialmente la arcilla, es particularmente importante porque responde a los tres principales objetivos de sostenibilidad: social (a través de su amplia accesibilidad, proporcionar vivienda; alrededor del 40% de la población vive en casas de tierra [7]. El uso de fibras vegetales para reforzar materiales de construcción a base de tierra es una práctica común en algunos métodos como el adobe y los revoques de tierra. En cuanto a los bloques de tierra comprimida (BTC), el uso de fibras vegetales como estabilizador es todavía una práctica relativamente menos común [5].

Uno de los refuerzos como estabilizaciones más comunes en el tapial es la tierra apisonada estabilizada con cemento (CSRE), el cual es un sistema altamente sostenible que se caracteriza por una baja demanda de energía y una pequeña cantidad de residuos generados durante el proceso de construcción. La estructura consta de capas apisonadas de mezcla húmeda realizadas en un encofrado colocado sobre una base estable. [9].

Muchas de las construcciones de tierra existentes se construyen en zonas sujetas a riesgo sísmico. En cuanto a otros materiales que presentan baja resistencia a la tracción, es posible recuperar edificaciones existentes en zonas sísmicas y de construir nuevas construcciones con tierra como material estructural, a comparación de edificaciones de mampostería, las edificaciones de está determinada por la capacidad de diseñar un sistema de refuerzo capaz de inducir en la estructura la capacidad de responder a acciones horizontales [10].

El presente estudio pretende abarcar tanto estabilizadores naturales como artificiales, se caracterizan los beneficios de cada uno, desventajas y tipo de uso.

Por otro lado, la mayor parte de productos usados hasta la fecha como aglutinante del suelo son más costosos energéticamente, lo cual implica una merma de sus posibilidades de ahorro en toneladas de CO₂ emitido por tonelada de producto final. Asimismo, se usaron materiales y sistemas de construcción de baja tecnología, bajo consumo de energía y bajo impacto. De manera que el 80% del peso del edificio es una mezcla de tierra, piedra y paja son recuperadas de la misma localidad. Un análisis del ciclo de vida de estas casas muestra que ha reducido en 50% las emisiones de CO₂. [12].

Según información extraída de la literatura, las fibras vegetales son una buena alternativa dentro de estos procesos constructivos, como las fibras de retama, lino, cáñamo, yute o fibras extraídas de bambú, caña y coco presentan las

propiedades de resistencia y adherencia necesarias para actuar como refuerzo del material de mampostería [11].

2. Metodología

Esta investigación se realizó por medio de una revisión sistemática de literatura científica publicada en la tierra apisonada, con relación a los tipos de esfuerzos existentes en el mundo, haciendo una comprobación de la funcionalidad que es reforzar el método constructivo tradicional del tapial, sin afectar al entorno, demostrando las técnicas que sean más sustentables, realizando una comparativa entre refuerzos industriales y refuerzos naturales. Para su elaboración, se han seguido las directrices de la declaración PRISMA [13,14] para la correcta realización de revisiones sistemáticas (Figura 1).

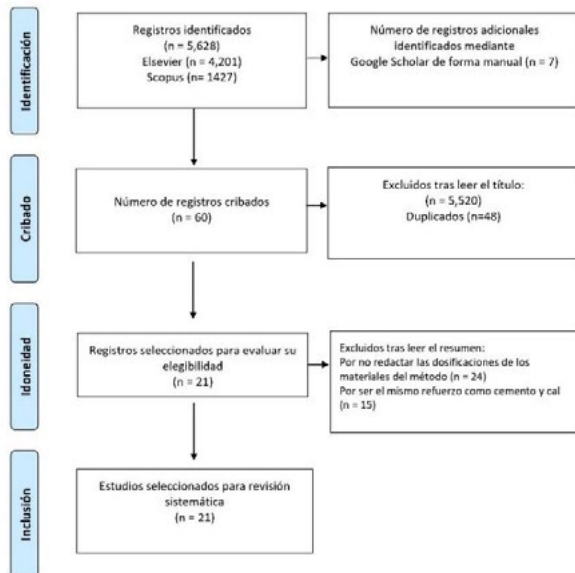


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA en cuatro niveles.

A) Búsqueda inicial

Las primeras búsquedas se realizaron en diciembre del 2023, combinando los terminos “tapial” y “tierra apisonada” en las bases de datos PubMed, Science-Direct y Scopus.

Posteriormente se buscaron los términos “muro de tierra”, “arcilla” “suelos arcillosos”. Estas búsquedas arrojaron buenos resultado, algunos eran repetidos, se fueron eliminando y otros se enfocaban en temas que no aportaban lo suficiente.

B) Búsqueda sistemática

La búsqueda sistemática se realizó nuevamente en febrero de 2024, en PubMed y ScienceDirect, acotando los resultados a las publicaciones realizadas desde 2023 (inclusive) hasta la actualidad. Las publicaciones abajo del 2012 se descartaron, concretamente, se obtuvieron 4,201 artículos de Elsevier y 1,427 artículos de Scopus. Antes de procedera la selección de artículos, se definieron los criterios de inclusión y exclusión.

C) Criterios de inclusión

- Que escriban las dosificaciones de los materiales de la mezcla del tapial.
- Que se estudie el contexto económico.
- Que se estudie el contexto social y de impacto tecnológico.
- Qué se explicara el método constructivo que usaron.

D) Criterios de exclusión

- Se excluyen las investigaciones que son libros o manuales de construcción de una casa de tapial.
- Investigaciones que son publicadas antes del año 2012.
- Si se trata de compactaciones de suelos arcillosos solo en cimentaciones.
- -El tipo de refuerzo no es innovador

Según estos criterios y considerando las lecturas de los títulos, se consideraron 60 artículos. Se leyeron las lecturas y a partir del

resumen se descartaron 24 por no contener las dosificaciones de los materiales del método, además, al utilizar el mismo refuerzo como cemento y cal, se descartaron 15.

Finalmente 21 artículos cumplieron con los criterios de inclusión y se seleccionaron para llevar a cabo la revisión sistemática. Todos ellos señalaban el método constructivo con los porcentajes de materiales de la mezcla del tapial que ocuparon. En las investigaciones (SRE) tierra apisonada (n=5) han sido con cemento, (n=3) han sido reforzadas con acero, en otros (n=10) son reforzados con fibras naturales como yute, fibras de coco, palmeras y fibras recicladas.

Resultados y discusión

Un resumen de los resultados encontrados se muestra en la Tabla 1 Comparativa de las dosificaciones:

https://drive.google.com/file/d/1Gpse7mgf8c8ue4FSXygbPyXQ15wBSFDc/view?usp=drive_link se muestran los porcentajes de las mezclas de 21 trabajos, haciendo una comparativa de refuerzos y estabilizantes,

En las investigaciones se pueden encontrar resultados muy favorables, además algunos que cumplen con su alcance, mientras que en otros sus resultados no son tan notorios. Como se mencionó anteriormente, los muros de tierra apisonada estabilizada con cemento (CSRE) son el reuerzo más común, R. Lepakshi [36] mezcló 16% de arcilla con una cantidad conocida de cemento (7% y 10% en masa) descubriendo así que la resistencia de la unión de las barras de refuerzo en la matriz CSRE estaba muy influenciada por la densidad seca del CSRE y el tipo de refuerzo. La fuerza de unión de las barras deformadas es mayor que la de las barras simples, independientemente de la densidad de la muestra.

La utilización del cemento depende de la resistencia necesaria del proyecto y se puede utilizar para mejorar la capacidad de carga

general, especialmente en cargas uniaxiales. Aunque el 7% de cemento usado simultáneamente con fibras en este documento no se considera lo suficientemente ambiental, aún así, los elementos FR no estabilizados en esta investigación han demostrado ser suficientemente fuertes para ser utilizados en aplicaciones convencionales. Además de lograr energías renovables dúctiles y más fuertes, la utilización de fibras textiles de neumáticos de desecho (WTTF) también puede contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible al reutilizar residuos peligrosos y duraderos, ahorrar un valioso espacio en los vertederos para mejores propósitos y evitar el empleo de otros materiales más caros, pero no ecológicos, que se proponen para las energías renovables reforzamiento [37].

La estabilización de con cemento también se ha aplicado junto con fibras naturales, en el caso que muestra Satya [38] El análisis XRD reveló la presencia de cuarzo, calcita, albita y pequeñas cantidades de otros minerales; por otro lado, la estabilización con cemento aumentó los picos de calcita. La estabilización con cemento reduce la porosidad de la estructura del material, mejorando así las propiedades de resistencia y durabilidad. El refuerzo de fibra de coco mezclado con el estabilizante del cemento aumenta la eficiencia de las muestras de tierra apisonada. Por otro lado la adición de Plasticure se reduce en gran medida la pérdida de masa por inmersión y cepillado para muestras de RE estabilizadas con cemento. Sin embargo, Plasticure no afectó significativamente la pérdida de masa para RE activados con álcali, cal o autoactivados [47].

Al usar cal como estabilizador se favorece el método, el límite de contracción tiene aumento importante desde la primera hora del contacto y sigue incrementándose con el tiempo pero este aumento es poco favorable; éste valor es importante porque representa la

humedad a la que el suelo ya no presenta variaciones volumétricas, por lo que su aumento indica un comportamiento más favorable[39]. Pero por otro lado no en todos los ámbitos es viable. La dosificación cal- zeolita del espécimen CZ /% cal y 6% zeolita) [40].

En las figuras 2 y 3 se muestra el contenido de humedad de los suelos y la resistencia a la flexión de muestras seleccionadas en este estudio, como comparativa de información.

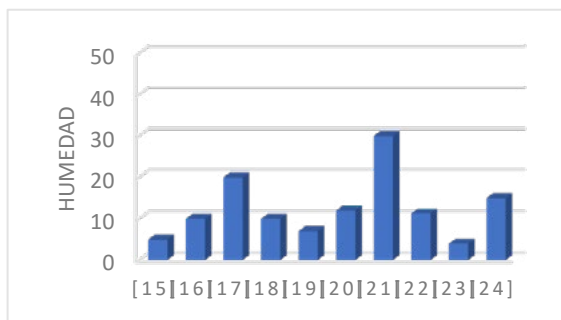


Figura 2. Contenido de humedad de los suelos.



Figura 3. Resistencia a la flexión de las muestras seleccionadas.

Respecto a los costos de una vivienda de tapial, existe una gran diferencia abarcando mampostería, adobe y madera, se puede observar en la figura 6 https://drive.google.com/file/d/1oe8blpICOsuPm74j0B8vwLKXxrK4Ykfe/view?usp=drive_link [6], [41].

El uso de paredes de RE estabilizadas con sulfonato de lignina da como resultado un incremento de la demanda de calefacción en aproximadamente un 32%, probablemente debido a la mayor conductividad térmica,

mientras que el confort térmico mejora ligeramente [42].

En las figuras 4 y 5 se muestra una comparativa de los estudios que usan refuerzos de fibra natural, cemento, acero y polímeros, así como el porcentaje de los que usan en su método Arcilla y Arcilla + Limo.

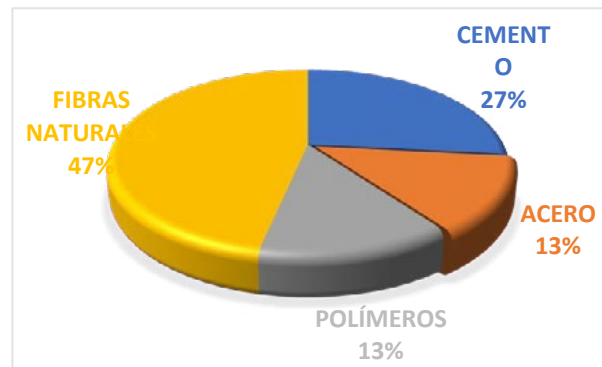


Figura 4. Comparativa de refuerzos

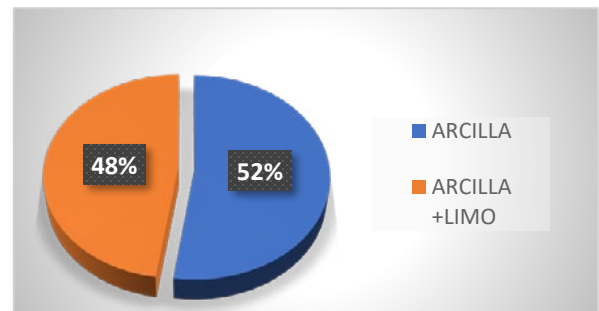


Figura 5. Comparativa de suelo

Los refuerzos con vigas son otra opción viable en zonas de alta sismicidad, los resultados obtenidos mostraron que considerar un anillo horizontal delgado reforzado con vigas colocadas a media altura de la estructura y cuatro columnas internas de hormigón armado en la intersección de los muros, puede mejorar la capacidad sísmica de las casas de ER. [43].

También se han utilizado desechos como forma sostenible para reforzar. La sustitución parcial del cemento por se trata de la sustitución del cemento por cenizas volantes activadas con álcalis (AAFA) mejoró la velocidad del pulso, la resistencia a la compresión, el módulo elástico, la

cohesión intracapa y la energía disipada en corte. [48].

Por otro lado, en algunos estudios recientes, se utilizaron fibras naturales para reforzar algunos materiales de construcción distintos de los de tierra, y cuando se usaron, las fibras mostraron con resultados prometedores, especialmente en lo que respecta al comportamiento mecánico y al rendimiento térmico [50]. La importancia de este estudio radica en presentar el concepto de refuerzo fibroso, acero, cal, cemento, desechos, como se presentan en los resultados, los cuales han sido favorables para la presente investigación.

En una investigación de Reducción de impacto ambiental por sistema del tapial redacta que la comparación de los valores obtenidos para sendos sistemas constructivos de fachada, se puede afirmar que el muro de tapial permite un ahorro del 64% de energía incorporada a los materiales de construcción y su puesta en obra, La edificación con tierra posibilita la reintroducción de los materiales locales en los sistemas constructivos, a la vez que permite reducir a un tercio las emisiones de CO₂ vertidas a la atmósfera y a un cuarto la energía incorporada como consecuencia de la construcción de una fachada.

El trabajo de Caterllanaus presenta dos hipótesis para demostrar y cuantificar la reducción de energía de una construcción de vivienda de tapial, arrojando esta serie de datos en la tabla 2,3,4 y 5: https://drive.google.com/file/d/1E3UVpPF1BBV93Qd2V4GkDsQm7f_LLRTK/view?usp=sharing [44]. Cuando no se refuerza el tapial, los muros RE no reforzados muestran una fuerte vulnerabilidad contra las cargas fuera del plano con falla de una gran sección de la fachada del muro y separación en las juntas de las esquinas [45].

La resistencia de un muro RE es de lo más complicado soportar cargas fuertes, en el estudio Wangmode trabajan con dos métodos. La resistencia a la compresión y al

corte de las billeteras RE se evalúan examinando el efecto de diferentes parámetros sobre su resistencia. Se consideraron dos parámetros, a saber, la capa RE y el período de secado para las billeteras RE probadas bajo carga de compresión. [46]. La estabilización química del suelo (por ejemplo, mediante la adición de cemento) es una opción que puede permitir que los GRS se utilicen en construcciones de tierra apisonada si no son adecuados para URE. Sin embargo, la energía incorporada y el costo de la construcción con tierra apisonada aumentarían sustancialmente [49].

3. Conclusiones

Se identifican y se abordan las dosificaciones los tapiales, llegando a la conclusión que en los reforzamientos naturales existe un mayor impacto económico y los resultados de resistencia son similares a los métodos con refuerzos industriales. Dentro de las desventajas de los refuerzos inorgánicos se encuentra la ubicación y el alcance de sus materiales. Los dos tipos de refuerzos son adecuados para este sistema, la elección del material dependerá de ubicación, clima, alcance de material y método constructivo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la oportunidad de publicar en este consejo, haciéndonos partícipes de un congreso de innovación tecnológica.

Referencias

1. S. Siddiqua, PNM Barreto, Estabilización química de tierra apisonada utilizando residuos de carburo de calcio y cenizas volantes, Constr. Construir. Madre. 169 (2018) 364–371, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.209>.
2. Kebao, R., Kagi, D., 2012. 10 - Aditivos integrales y tratamientos superficiales para modernos edificios de tierra. En: Edificaciones, Materiales, Ingeniería, Construcciones y Aplicaciones Modernas de Tierra. Woodhead Publishing Series in Energy, págs. 256–281. <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.256>.
3. Keefe, L. Métodos y materiales de construcción con tierra, reparación y conservación; Taylor y Francis: Londres, Reino Unido, 2005; pag. 7.
4. Salih Kocak y Aneurin Grant. “Mejora de las propiedades mecánicas de la construcción con tierra apisonada estabilizada con polímeros”. En: Materiales de construcción 3 (2023), págs. 377-388.
5. Koutous, A. y Hilali, E. (2021). Reforzamiento de tierra apisonada con fibras vegetales: un estudio de caso. Estudios de casos en materiales de construcción, 14, e00514.
6. A. Arrigoni, CTS Beckett, D. Ciancio, R. Pelosato, G. Dotelli, A.-C. Grillet, Tierra apisonada que incorpora áridos de hormigón reciclado: una solución constructiva sostenible, resistente y transpirable, Resour., Conserv. Reciclar. 137 (2018) 11-20.
7. Li, X.; Zhong, Q.; Tang, M.; Gao, Y.; Feng, C. Análisis experimental y numérico del comportamiento higiénico de edificios de tierra después del tratamiento de hidrofobización de fachadas. Semental de la casa. Construcción Madre. 2023, 19, e02217.
8. Tormenta Bly y Schmidt Arno. “Un informe sobre la investigación y la construcción contemporánea con tierra apisonada en América del Norte”. En: Sostenibilidad 5.2 (2013), págs. 400-416.
9. Anysz Hubert y Piotr Narloch. “Diseño de la composición de tierra apisonada estabilizada con cemento utilizando redes neuronales artificiales”. En: Materiales 12.1396 (2019).
10. Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A. Una revisión simple del refuerzo del suelo mediante el uso de fibras naturales y sintéticas. Construcción Build Mater 2012; 30.
11. Fagone, M., Hilali, E., Loccarine, F., & Ranocchiai, G. (2017). Evaluación de resistencia de tejido de yute para el refuerzo de estructuras de tierra apisonada. Compuestos, e0013.
12. Carmen Galán-Marín, Carlos Rivera-Gómez et al. “Procedimiento para la estabilización de suelos arcillosos con polímeros orgánicos naturales y armados con fibras animales.” En: Oficina Española de Patentes y Marcas (2012).
13. Sokol-Hessner P, Camerer CF, Phelps EA. Emotion regulation reduces loss aversion and decreases amygdala responses to losses. Soc Cogn Affect Neurosci 2013; 8: 341-50.
14. Barkley-Levenson EE, Van Leijenhorst L, Galván A. Behavioral and neural correlates of loss aversion and risk avoidance in adolescents and adults. Dev Cogn Neurosci 2013; 3: 72-83.
15. Noemie Prime Taini Chitimbo Feras Abdulsamad et al. “Impacto del contenido de humedad en el comportamiento elasto-viscoplastico de un muro de tierra apisonada: nuevos hallazgos”. En: Construcción Madre 3 (2022), págs. 1-13.
16. Fagone, M., Loccarini, F., & Giovanna Ranocchiai, G. (2017). Evaluación de resistencia de tejido de yute para el refuerzo de estructuras de tierra apisonada. *Compuestos Parte B*.
17. Bertrand François, B., Palazón, L., & Gerard, P. (2017). Comportamiento estructural de construcciones de tierra apisonada no estabilizadas sometidas a condiciones higroscópicas. *Materiales de Construcción y Construcción*, 155.
18. Guettala, A., Abitsi, A., & Houarib, H. (2012). Estudio de durabilidad del hormigón de tierra estabilizada bajo exposición a condiciones climáticas y de laboratorio. *Materiales de Construcción y Construcción*, 20(3), 129-127.
19. Ciancio Daniela. “Investigación experimental sobre la resistencia a la compresión de muestras de tierra apisonada estabilizadas con cemento y moldeadas”. En: *Materiales de Construcción y Construcción* 28.1 (mar. de 2012), págs. 294-304.
20. Jayasinghe C., Kamaladasa N. Características de resistencia a la compresión de muros de tierra apisonada estabilizados con cemento. *Construcción Construir. Madre*. 2007; 21 :1971–1976.
21. Tormenta Bly y Schmidt Arno. “Un informe sobre la investigación y la construcción contemporánea con tierra apisonada en América del Norte”. En: *Sostenibilidad* 5.2 (2013), págs. 400-416.
22. Juan C. Reyes2 Natalia Barrera1 Daniel M. Ruiz1. “Rendimiento sísmico de un modelo de tierra apisonada de dos pisos a escala 1:4 reforzado con placas de acero probado en una mesa vibratoria biaxial”. En: *Edificios* 13.2950 (2023).
23. Amin Ramezania, Özgür Gocer, & Toktam Bashirzadeh Tabrizi. (2024). El análisis del ciclo de vida de la tierra apisonada estabilizada y reforzada con fibras naturales en el contexto de Australia. *Materiales de Construcción y Construcción*, 416.
24. Sima Samadianfard, & Vahab Toufigh. (2023). Efecto de estabilización sobre el comportamiento higrotérmico de materiales de tierra apisonada. *Materiales de Construcción y Construcción*, 409.
25. A. Ghorbani, T. Chitimbo, A. Revil, N. Primer, K. Zhang, T. Fu, o. Ple. (2023). Imágenes del contenido de agua durante el ascenso capilar dentro de una estructura de tierra apisonada. *Ingeniería Geológica*, 325.
26. Satya Sai Profundo Raavi, & Deb Dulal Tripura. (2023). Comportamiento compresivo y cortante de carteras de tierra apisonada estabilizadas con cemento y reforzadas con

- fibra de coco, tablillas de bambú y barras de acero. *Estructuras*, 53, 1389-1401.
27. A. Koutous, & E. Hilali. (2014). Reforzamiento de tierra apisonada con fibras vegetales: un estudio de caso. *Estudios de Caso En Materiales de Construcción*, 14.
 28. Ernest Bernat Masó, Christian Escrig, & Christian Escrig. (2016). Tierra apisonada reforzada con textiles: caracterización experimental de la resistencia a la flexión y la densidad. *Materiales de Construcción y Construcción*, 106, 470-479.
 29. Tiegang Zhou. (2019). Estudio experimental sobre las pruebas de mesa vibratoria de una estructura moderna de tierra apisonada reforzada interiormente. *Materiales de Construcción y Construcción*, 203, 567-578.
 30. Rafael Ramírez Eudave, & Rui A. Silva et al. (2022). Contracción temprana y adherencia del refuerzo LC-TRM en tierra apisonada. *Materiales de Construcción y Construcción*, 350.
 31. Alexandra H. Meek, & Mohamed Elchalakani. (2021). Materiales alternativos de tierra apisonada estabilizada que incorporan residuos reciclados y subproductos industriales: un estudio de propiedades mecánicas, flexión y resistencia de unión. *Materiales de Construcción y Construcción*, 277.
 32. Bipul Sen, & Rajib Saha. (2022). Investigación experimental y numérica de las características de resistencia mecánica de muros de tierra apisonada rehabilitados con fibras naturales. *Geotextiles y Geomembranas*, 50(5), 970-993.
 33. Abdelhakim el Bourki, Ahmed Koutous, & Elmokhtar Hilali. (2023). Una revisión sobre el uso de fibras de palmera datilera para reforzar materiales de construcción a base de tierra. *Materiales Hoy En Día*.
 34. Amin Ajabi Naeini, & Sumi Siddiqua. (2021). Una nueva tierra apisonada estabilizada que utiliza cenizas volantes de fábricas de celulosa como material cementante alternativo con bajas emisiones de carbono. *Materiales de Construcción y Construcción*, 300.
 35. Lorenzo Miccoli, Urs Müller, & Stanislav Pospíšil. (2017). Muros de tierra apisonada reforzados con tiras de tejido de poliéster: análisis experimental bajo carga cíclica en el plano. *Materiales de Construcción y Construcción*, 149, 29-36.
 36. R. Lepakshi, & B.V. Venkatarama Reddy. (2020). Fuerza de unión de barras de refuerzo en tierra apisonada estabilizada con cemento. *Materiales de Construcción y Construcción*, 255.
 37. Pouria Zare, & Shayan Sheikhi Narani et al. (2020). Investigación experimental de refuerzo de tierra apisonada no estabilizada y estabilizada con cemento mediante fibras textiles de neumáticos de desecho (WTTF). *Materiales de Construcción y Construcción*, 260.
 38. Satya Sai Profundo Raavi, & Deb Dulal Tripura. (2020). Predicción y evaluación de las propiedades de ingeniería de bloques de tierra apisonada reforzados con fibra no estabilizados y estabilizados con cemento. *Materiales de Construcción y Construcción*, 262.
 39. Teresita De Jesus Guerrero Escamilla. "Análisis del tiempo óptimo de reacción en la estabilización de un suelo arcilloso tratado con cal". En: (2012).
 40. Antonio Hernandez Francisco et al. "Comportamiento mecánico de un suelo arcilloso estabilizado con puzolanas y cal como material para capa sub base". En: (2023).
 41. Keun Byoung Yoon, & Hyun Min Ryu. (2021). Resistencia a la compresión mejorada de muros de tierra apisonada estabilizados con un sistema polimérico multifuncional ecológico. *Reseñas de Energías Renovables y Sostenibles*, 152.
 42. Alessia Emanuela Losini, & Anne-Cecile Grillet. (2023). Impacto de los biopolímeros en las propiedades higrotérmicas de la tierra apisonada: del material a la escala de construcción. *Construcción y Medio Ambiente*, 233.
 43. Tien-Dung Nguyen, & Tan-Trung Bui. (2021). Evaluación del comportamiento sísmico de construcciones de tierra apisonada y soluciones de mejora. *Revista de Ingeniería de la Construcción*, 43.
 44. Àngels Castellarnau Visús (2014). Reducción del impacto ambiental en la edificación mediante la selección consciente de materiales de construcción. *Revista de Ciencias*, 35-51.
 45. Kshitij C. Shrestha, & Takayoshi Aoki et al. (2020). Refuerzo de estructuras de tierra apisonada con intervenciones sencillas. *Revista de Ingeniería de la Construcción*, 29.
 46. Phuntsho Wangmo, & Kshitij C. Shrestha. (2021). Estudio exploratorio de muros de tierra apisonada bajo ensayo de elementos estáticos. *Materiales de Construcción y Construcción*, 266.
 47. Alexandra H. Meek, & Christopher T.S. (2020). Materiales alternativos de tierra apisonada estabilizada que incorporan residuos reciclados y subproductos industriales: durabilidad con y sin repelencia al agua. *Materiales de Construcción y Construcción*, 265.
 48. Kosarimovahhed, & Vahab Toufigh. (2020). Aprovechamiento sostenible de materiales de desecho como estabilizador en estructuras de tierra apisonada. *Revista de Producción Más Limpia*, 277.
 49. Rui A. Silva, & Daniel V. Oliveira. (2013). Construcción de tierra apisonada con suelos residuales graníticos: el estudio de caso del norte de Portugal. *Materiales de Construcción y Construcción*, 47, 181-191.
 50. Tayeh, B., Hadzima-Nyarko, M., Riad, M. Y. R. y Hafez, R. D. A. (2023). Comportamiento del hormigón de ultra altas prestaciones con residuos de fibras sintéticas híbridas expuestos a temperaturas elevadas. *Edificios*, 13(1), 129.

Reemplazo Parcial del Cemento en Concretos con Materiales Alternativos: Una Revisión de la literatura

Partial Replacement of Cement in Concrete with Alternative Materials: A literary Review

Santiago Bautista Anahi, Hernández Zaragoza Juan Bosco, Montoya Zamora Ricardo y Horta

Rangel Jaime Moisés

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

asantiago22@alumnos.uaq.mx

Palabras clave: concreto, cemento, materiales alternativos, reemplazo

Resumen

La industria del cemento es clave para satisfacer las necesidades de infraestructura a nivel global. Sin embargo, la producción de cemento genera impactos ambientales significativos, representando alrededor del 7% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Dada la creciente demanda de infraestructura, se espera que la producción de cemento continúe aumentando, lo que ha impulsado la búsqueda de materiales alternativos que puedan reemplazar parcial o totalmente el cemento.

Para realizar este artículo, se llevó a cabo una revisión profunda y un exhaustivo análisis de la literatura científica en el campo del cemento, esto permite indicar los potenciales materiales como vidrio reciclado, escoria de alto horno, ceniza volante, metacaolín, sílice geotérmica y ceniza de biomasa vegetal, que, además de reducir la huella de carbono, mejoran la durabilidad, resistencia y trabajabilidad del concreto.

Estudios recientes han mostrado resultados positivos al reemplazar entre el 5% y el 50% del cemento por estos materiales, observándose mejoras en las propiedades mecánicas del concreto y reducciones en las emisiones de CO₂. A pesar de sus beneficios, el uso de estos materiales aún es limitado en algunos países, lo que resalta la necesidad de promover su implementación en la construcción.

Keywords: concrete, cement, alternative materials, replacement

Abstract

The cement industry is essential for meeting global infrastructure needs. However, cement production significantly impacts the environment, accounting for around 7% of global greenhouse gas emissions. With rising infrastructure demands, cement production is expected to increase, driving the search for alternative materials that can partially or fully replace cement.

This article presents a comprehensive literature review identifying potential materials like recycled glass, blast furnace slag, fly ash, metakaolin, geothermal silica, and plant biomass ash. These materials not only reduce the carbon footprint but also enhance concrete's durability, strength, and workability. Recent studies have shown positive results, with cement replacements of 5-50% leading to improvements in concrete properties and reductions in CO₂ emissions. Despite these benefits, the adoption of these materials remains limited in some countries, highlighting the need to promote their use in construction.

1. Introducción

La industria de cemento es una parte fundamental para satisfacer las necesidades de la infraestructura global, este material es esencial en la construcción de edificios, puentes, carreteras y otras estructuras civiles. E cemento es definido como un material que, al mezclarse con agua, forma una pasta que se endurece con el tiempo debido a reacciones químicas llamadas "hidratación" (Neville y Brooks, 2010).

A lo largo de las últimas décadas, la producción de cemento ha aumentado exponencialmente, esto impulsado por la demanda urbana actual; este crecimiento trae consigo grandes desafíos en términos de sostenibilidad ambiental con esto nos referimos al conjunto de prácticas que buscan preservar y proteger los recursos naturales y el medio ambiente para las futuras generaciones. En el contexto del concreto y la construcción, implica minimizar el impacto ambiental mediante el uso eficiente de materiales, reducción de emisiones de carbono, y prácticas que respeten la biodiversidad (Mehta & Monteiro, 2014; Scrivener et al., 2018).

Otro de los términos importantes que se deben de tener en cuenta es la Sostenibilidad del Cemento, este concepto es una rama de la sostenibilidad ambiental específica de la industria cementera. Se centra en desarrollar tecnologías y procesos que reduzcan el impacto ambiental del cemento, como el uso de materiales alternativos (cenizas volantes, escorias), reducción del uso de clinker, y la adopción de técnicas de producción más limpias (Gartner & Hirao, 2015; Damtoft et al., 2008).

De acuerdo con la *Asociación Mundial del Cemento* esta industria es responsable de aproximadamente el 7% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y es posiblemente el sector más difícil de reducir, a su vez la *Hoja de Ruta de Tecnología del Cemento de la Agencia Internacional de Energía (IEA)* y la *Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento (CSI)* predice, que la producción mundial de cemento crecerá entre un 12 y un 23 % para 2050, por lo que diversos investigadores se han dedicado a la búsqueda de materiales alternativos que cumplan con la sustentabilidad (Scrivener et al., 2018).

El cemento se utiliza principalmente como aglomerante en mezclas de concreto y mortero, y se produce mediante la molienda del clinker (obtenido al calentar materiales calizos y arcillosos) junto con pequeñas cantidades de otros aditivos como el yeso.

El concreto es un material de construcción compuesto por una mezcla de cemento, agua, agregados finos (arena) y agregados gruesos (grava o piedra triturada). Cuando se mezcla el cemento con agua, ocurre un proceso de hidratación que hace que la mezcla se endurezca y forme una masa sólida (Kumar Mehta y Monteiro, 2014). Gracias a su alta resistencia a la compresión, el concreto se usa ampliamente en la construcción de estructuras como pavimentos, edificios, puentes y presas. Las propiedades del concreto pueden modificarse mediante el uso de aditivos o sustitutos parciales de materiales, permitiendo adaptarlo a condiciones y necesidades específicas (Mindess, 2007).

El objetivo de esta revisión bibliográfica es indagar sistemáticamente en la literatura existente sobre el uso de materiales utilizados como reemplazo parcial o total del cemento en mezclas de concreto donde se analizaron las propiedades mecánicas del concreto, los cuales se detallan en el siguiente apartado.

2. Métodos

Se llevó a cabo una búsqueda de artículos para el período comprendido entre 2015-2024, este basado en regulaciones o normativas que han cambiado, para evitar investigaciones obsoletas. Se indagó en diversas bases de datos tales como: Scopus, EBSCOhost, Scielo, ProQuest, ScienceDirect y redalyc; de esta manera se recopilaron investigaciones que emplearon vidrio reciclado, escoria granulada de alto horno, ceniza volante, metacaolín y sílice geotérmica, ceniza de biomasa vegetal para la elaboración de concreto.

3. Resultados y discusión

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial, pero su producción genera importantes impactos ambientales, principalmente debido a la fabricación del cemento, el componente principal del concreto. Materiales como las cenizas volantes, la escoria de alto horno, las puzolanas naturales, el humo de sílice y polímeros sintéticos, entre otros, ofrecen varias ventajas al ser incorporados en las mezclas de concreto, en la Tabla 1, se presenta un resumen de algunos materiales que se han investigado para usar como reemplazo del cemento en diferentes porcentajes. Estos materiales no solo contribuyen a reducir la huella de carbono, sino que también mejoran algunas propiedades mecánicas del concreto, como su resistencia a la compresión, durabilidad, es decir, extender el tiempo de

vida del concreto en entornos agresivos en comparación con cementos convencionales. Al analizar concretos en condiciones de exposición prolongada a sulfatos, logrando vidas útiles significativamente superiores; la resistencia a la compresión de cementos ecoeficientes que incorporan materiales como geopolímeros y escorias, los cuales pueden alcanzar resistencias mecánicas comparables a los concretos que utilizaron solo cemento Portland y la trabajabilidad, reduciendo la cantidad de agua incorporada a la mezcla, sin afectar la resistencia, lo cual es particularmente útil en mezclas sostenibles que requieren propiedades de alto rendimiento (Mindess, 2007; Gartner et al., 2015). Además, el uso de estos reemplazos apoya la gestión de residuos industriales, generando un beneficio tanto ambiental como económico.

3.1 uso de materiales como escoria granulada, metacaolín y sílice geotérmica como reemplazos parciales del cemento

Los investigadores L. Y. Gómez-Zamorano et al., 2015, realizaron pruebas con niveles de reemplazo de cemento con escoria granulada, metacaolín y sílice geotérmica, todos en un 30%, 40% y 50%, a diferentes temperaturas de curado en agua potable (20 y 50°C) durante 180 días. Los resultados revelaron que estos materiales de reemplazo mostraron un alto grado de reactividad, ya que la principal diferencia entre los cementos portland y los reemplazados fue la intensidad en la reflexión del hidróxido de calcio, presentándose una disminución en los cementos reemplazados debido a la reacción puzolánica, lo cual está relacionado con el aumento en los valores de resistencia a la compresión. Lo que llevó a un incremento en las propiedades mecánicas de hasta un 200% en comparación con el cemento. Esto se traduce en una matriz más densa y una reducción en la porosidad del material final. El estudio destaca la importancia de estos subproductos industriales para mejorar la sostenibilidad en la industria

del cemento, al reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la reducción de su producción.

3.2 Uso de materiales de ceniza volante, como reemplazos parciales del cemento

La incorporación de ceniza volante en el concreto, en cantidades adecuadas (1%-3%), mejora la resistencia y durabilidad del material, así como su trabajabilidad. Esto se debe a las propiedades puzolánicas de la ceniza, que contribuyen a la formación de

compuestos que mejoran la estructura del concreto, además de no solo reduce el costo del material, sino que también disminuye la huella de carbono asociada con la producción de cemento.

A pesar de sus beneficios, el uso de ceniza volante en el país es limitado debido a la falta de información y difusión sobre sus ventajas en la construcción, lo que sugiere la necesidad de promover su uso.

Tabla 1. Materiales utilizados en el reemplazo parcial de cemento en mezclas de concreto

Fuente: Elaboración propia

Tipo de material	Tipo de cemento	Relación agua/material cementante	Porcentaje de reemplazo	Propiedades analizadas	Referencia
Escoria granulada de alto horno	Cemento Portland	0.4	30%, 40% y 50%	Microestructura	(Gómez Zamorano et al., 2015)
	Portland tipo I	0.4	30%, 40% y 50%	Microestructura	(Gómez Zamorano et al., 2015)
Ceniza volante	Cemento Portland	0.48	100%	Resistencia a la compresión y módulo de rotura	(Prieto et al., 2019)
	Tipo IP puzolánico	0.56	2.5% hasta 15%	Resistencia del concreto	(Cáceres & Quispe, 2018)
Metacaolín	Cemento Portland	0.4	30%, 40% y 50%	Microestructura	(Gómez Zamorano et al., 2015)
Sílice geotérmica	Cemento Portland	0.4	30%, 40% y 50%	Microestructura	(Gómez Zamorano et al., 2015)
Cenizas de biomasa vegetal	Cemento Portland	---	15% y 30%	caracterización física	(De Paula et al., 2021)
Vidrio Reciclado	Cemento Portland (P-35)	0.7	10%, 20% y 30%	Resistencia a la compresión	(De los Ángeles Columbié-Lamorú et al., 2020)
Filler Basáltico	Cemento Portland	---	5%, 10%, 15%, 20% y 25%	Resistencia a la compresión axial	(Meinhart et al., 2023)
Zeolita Superfina	Cemento Portland Ordinario	0.55 - 0.65	5%, 10%, 15% y 20%	Resistencia a la compresión	(Chen et al., 2018)

3.3 Uso de vidrio reciclado, como reemplazo parcial del cemento

Los investigadores Columbié-Lamoru et al., 2020, reportaron el resultado, del reemplazo del cemento por vidrio molido respecto al 10%, 20 % y 30 % en masa.

En el intervalo desde los 7 hasta los 28 días de curado de las mezclas, la resistencia a la compresión se incrementó gradualmente, obteniéndose en las muestras M1, M4 y M5 valores que sobrepasan el de la muestra patrón con una resistencia a los 28 días de curado de 16.43 MPa. Los resultados obtenidos en los ensayos a compresión confirman la factibilidad de reemplazar por vidrio molido hasta el 20 % del cemento, sin que se afecte la resistencia a la compresión, establecida en la norma ISO 1920-2. 2010: Ensayos al hormigón –parte 2: propiedades del hormigón fresco. La Habana: Oficina Nacional de Normalización. (25-35 MPa) para el concreto tradicional.

3.4 Uso de Filler Basáltico, como reemplazo parcial del cemento

Un filler basáltico es un material de relleno que se incorpora en mezclas de concreto o cemento. Comúnmente se emplea polvo de basalto, un agregado fino que mejora la compactación y contribuye a las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto al optimizar la estructura de los poros y facilitar el desarrollo de la matriz de cemento. Sin embargo, el basalto presenta poca o nula actividad puzolánica, por lo que actúa principalmente como inerte, acelerando la hidratación inicial y aumentando la resistencia temprana de la mezcla (El-Didamony et al., 2015).

Las investigaciones realizadas por Meinhart *et al.*, 2023 consistieron en realizar mezclas con filler Basáltico mostrando una resistencia a la

compresión inferior en comparación con el cemento Portland, se realizaron reemplazos parciales con un 5 % hasta un 25%, obteniendo resistencias aproximadamente de un 6.1 % menor que la de la mezcla de referencia. Los investigadores concluyeron que las muestras con reemplazo de cemento por filler basáltico tienen a disminuir su resistencia mecánica en todas las etapas evaluadas (7, 28, 90 y 180 días de curado), esto sugiere que el filler actúa más como un material de relleno que como un agente cementante.

3.5 Uso de Zeolita Superfina, como reemplazo parcial del cemento

El estudio realizado por Chen *et al.*, 2018 realizaron investigaciones sobre el reemplazo parcial de cemento Portland ordinario (OPC) empleado en esta investigación fue de la clase de resistencia 42.5N según la norma europea EN 197: Parte 1: 2011. La zeolita superfina (SZ) utilizada fue del tipo clinoptilolita de una fuente natural en la provincia de Henan, en la parte central de China. Se molía hasta obtener un tamaño superfino para su uso.

Para niveles de resistencia inferiores a 60 MPa, se recomienda una relación cemento/agregado de 0,55 o 0,65 en lugar de un valor constante de 0,75. Este ajuste puede conducir a una reducción en el contenido de cemento en aproximadamente un 10%, si bien las relaciones agua/cemento, específicas no se detallan en los extractos, se da a entender que mantener una relación agua/zeolita superfina, adecuada es crucial para lograr las características de rendimiento deseadas. La investigación indica que una relación agua/agregado más baja junto con un concreto de mayor resistencia puede ayudar a reducir el contenido total de cemento en la estructura.

Los hallazgos indican que agregar hasta un 5% de Zeolita Superfina para reemplazar el cemento puede mejorar la fluidez estática y dinámica y la resistencia del mortero. Sin embargo, las adiciones adicionales más allá

del 5% pueden conducir a una disminución de la fluidez y la resistencia, aunque pueden mejorar la cohesión

En conclusión, de esta investigación se encontró que para obtener un rendimiento óptimo cuando se utiliza zeolita como sustituto del cemento, es aconsejable utilizar una relación aglutinante/agregado de 0,55 o 0,65 para niveles de resistencia más bajos, mantener una relación agua/aglutinante adecuada y limitar el reemplazo de Zeolita Superfina a alrededor del 5% del contenido de cemento.

4. Conclusiones

Estas investigaciones subrayan la necesidad de promover el uso de estos materiales en la construcción, ya que no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino que también ofrecen un rendimiento superior en comparación con el concreto que utiliza únicamente cemento Portland.

A continuación, les presento algunas de conclusiones desde diversos ámbitos.

Reducción de la Huella de Carbono: La incorporación de materiales alternativos como cenizas volantes, escoria de alto horno y metacaolín en mezclas de concreto puede reducir significativamente la huella de carbono del concreto. Se ha observado que reemplazar entre el 5% y el 50% del cemento con estos materiales no solo disminuye las emisiones de CO₂, sino que también mejora las propiedades mecánicas del concreto, como su resistencia a la compresión y durabilidad.

Mejora de Propiedades Mecánicas: El uso de materiales como la zeolita superfina, cuando se reemplaza entre el 5% y el 20% del contenido de cemento, ha mostrado resultados positivos en términos de resistencia a la compresión. Sin embargo, se recomienda limitar el reemplazo a un 5% para mantener un

rendimiento óptimo y evitar la disminución de la fluidez y resistencia del concreto.

Durabilidad en Condiciones Adversas: Los concretos que incorporan materiales como geopolímeros y escorias han demostrado tener vidas útiles significativamente superiores en condiciones de exposición prolongada a sulfatos. Esto sugiere que el uso de estos materiales no solo es beneficioso para el medio ambiente, sino que también puede extender la vida útil de las estructuras en entornos agresivos.

Sostenibilidad en la Construcción: La revisión de la literatura indica que el uso de materiales alternativos en la producción de concreto es aún limitado en algunos países, a pesar de sus beneficios. Promover la implementación de estos materiales en la construcción puede contribuir a un desarrollo más sostenible y a la reducción de los impactos ambientales asociados con la producción de cemento.

Efectos en la Trabajabilidad: La incorporación de ciertos materiales alternativos puede mejorar la trabajabilidad del concreto, permitiendo una reducción en la cantidad de agua necesaria en la mezcla sin afectar la resistencia. Esto es particularmente útil en mezclas sostenibles que requieren propiedades de alto rendimiento.

Estas conclusiones resaltan la importancia de investigar y adoptar materiales alternativos en la industria del concreto, no solo para mitigar el impacto ambiental, sino también para mejorar las propiedades del material utilizado en la construcción.

Agradecimientos

A mi director de tesis al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, al Dr. Ricardo Montoya Zamora y al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel por el constante impulso para continuar con nuevas investigaciones y al CONACYT por el apoyo en el financiamiento del estudio de la

Maestría en Ingeniería de Vías terrestres y Movilidad y finalmente a la Universidad Autónoma de Querétaro por la beca institucional proporcionada.

Referencias

- [1] Akbari, J., & Abed, A. (2020). Experimental Evaluation of Effects of Steel and Glass Fibers on Engineering Properties of Concrete: Engineering Properties of Concrete. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 14(54), 116-127. <https://doi.org/10.3221/igf-esis.54.08>
- [2] *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 — IPCC*. (s. f.). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [3] Cáceres, S. H., & Quispe, G. B. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal Of High Andean Research*, 20(2), 255-234. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- [4] *Cement Market Size, Growth, Industry Share, Trends, 2032*. (s. f.). <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/cement-market-101825>
- [5] Cement Plant Environmental Handbook – third Edition. (s. f.). *International Cement Review*. <https://www.cemnet.com/Publications/cement-plant-environmental-handbook-3rd-edition>
- [6] Chen, J., Ng, P., Kwan, A., & Li, L. (2018). Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions. *Journal Of Cleaner Production*, 210, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.007>
- [7] Chowdhury, S., Mishra, M., & Suganya, O. (2014). The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: An overview. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(2), 429-437. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>
- [8] De los Ángeles Columbié-Lamorú, L., Crespo-Castillo, R., Rodríguez-Suárez, L., & González-Batista, Y. (2020). Evaluación del uso de vidrio reciclado en la producción de hormigones cubanos. *Redalyc.org*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223563028007>
- [9] De Paula, H. M., Gonçalves, C. F., & Soares, A. F. (2021). Caracterização e viabilidade de utilização de cinzas de biomassa vegetal em argamassa. *Revista ALCONPAT*, 11(2), 1-16. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.484>
- [10] El-Didamony, H., Helmy, I. M., Osman, R. M., & Habboud, A. M. (2015). Basalto como puzolana y relleno en cemento Portland ordinario. *Revista Americana de Ingeniería y Ciencias Aplicadas*, 8(2), 263–274. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2015.263.274>
- [11] Gómez Zamorano, L. Y., Iñiguez-Sánchez, C. A., & Lothenbach, B. (2015). Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas. *Revista ALCONPAT*, 5(1), eISSN 2007-6835. http://www.mda.cinvestav.mx/revista_alconpat
- [12] Kumar Mehta, P., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Hormigón: Microestructura, propiedades y materiales* (4a ed.). Profesional de McGraw-Hill.
- [13] Meinhart, A. H., Macedo, R. B., Guterres, T. T., & Arnold, D. C. M. (2023). Análise do potencial de uso do filer basáltico como

- substituição parcial do cimento Portland. *Ambiente Construído*, 23(4), 169-186. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000400697>
- [14] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Tecnología del hormigón* (2ª ed.). Prentice-Hall.
- [15] Prieto, L. C., Montañó, A. A., Parra, A., & Puerto-Suárez, J. D. (2019). Evaluación Mecánica y Ambiental del Uso de Ceniza Volante con Activación Alcalina como Alternativa de Reemplazo Total del Cemento en la Elaboración de Tabletas Prefabricadas. *Información Tecnológica*, 30(3), 67-82. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000300067>
- [16] Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Cementos ecoeficientes: Posibles soluciones económicamente viables para una industria de materiales a base de cemento con bajas emisiones de CO₂. *Investigación sobre el cemento y el hormigón*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- [17] Tamaño del mercado de cemento, participación y análisis de la industria, por tipo (Portland, mezclado y otros), por aplicación (residencial y no residencial) y pronóstico regional, 2024-2032. (2023). En *Fortune Business Insights* (N.º FBI101825). *Fortune Business Insights*.
- [18] Teixeira, E. R., Mateus, R., Camões, A. F., Bragança, L., & Branco, F. G. (2015). Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *Journal Of Cleaner Production*, 112, 2221-2230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.124>
- [19] Usman, M., Khan, A. Y., Farooq, S. H., Hanif, A., Tang, S., Khushnood, R. A., & Rizwan, S. A. (2018). Eco-friendly self-compacting cement pastes incorporating wood waste as cement replacement: A feasibility study. *Journal Of Cleaner Production*, 190, 679-688. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.186>
- [20] Wilbert, D. G. B., De Souza Kazmierczak, C., & Kulakowski, M. P. (2017). Análise da interface entre agregados reciclados de concreto e argamassas de concretos com cinza de casca de arroz e fíler basáltico por nanoindentação. *Ambiente Construído*, 17(2), 253-268. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000200156>

“Integración Filosófica y Tecnológica en la Arquitectura Conceptual: Sinergia entre Inteligencia Artificial y el Pensamiento”

“Philosophical and Technological Integration in Conceptual Architecture: Synergy between Artificial Intelligence and Thought”

Autores: Amador León, Ariel; López Domínguez, Guillermo Iván

Afiliación: Estudiante de Maestría, Maestría en Arquitectura, Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

Correo: arielcuba88@gmail.com

Palabras clave: Inteligencia Artificial, arquitectura conceptual, filosofía, creatividades, inferencias.

Resumen— La IA perfecciona la creatividad exploratoria y combinatoria, generando nuevas conmutaciones y mixturas, pero sigue marcando una carencia en la creatividad transformacional y las inferencias abductivas, las cuales requieren del juicio humano para romper paradigmas. Para aclarar las interconexiones entre percepciones filosóficas y la IA, así como, mejorar la sinergia entre artilugios y humanos en la arquitectura conceptual, se examinan términos clave desde concepciones filosóficas, que rigen el diseño arquitectónico conceptual. Hacia esta integración objetiva, se ha desarrollado una matriz epifilogenética que enlaza conceptos filosóficos con la IA, las convenciones inferenciales y la creatividad. Dar claridad y luz en este andar evolutivo entre máquinas y ser humano se hace de vital importancia en una época donde aspectos cognitivos se están desprendiendo de la matriz primogénita humana. Dar un paso más en resolver esa enigmática pregunta que nos salta, ¿Qué tanto estamos dispuestos o podemos ceder?, es parte del propósito de este trabajo.

Keywords: Artificial Intelligence, conceptual architecture, philosophy, creativity, inferences.

Abstract - AI refines exploratory and combinatorial creativity, generating new permutations and mixtures, but still shows a deficiency in transformational creativity and abductive inferences, which require human judgment to break paradigms. To clarify the interconnections between philosophical perceptions and AI, as well as to enhance the synergy between devices and humans in conceptual architecture, fundamental concepts are analyzed through philosophical frameworks that guide conceptual architectural design. Towards this objective integration, an epiphylogenetic matrix has been developed, linking philosophical concepts with AI, inferential conventions, and creativity. Shedding light and clarity on this evolutionary journey between machines and humans becomes vital at a time when cognitive aspects are detaching from the original human matrix. Taking a step further in answering the enigmatic question that confronts us, “How much are we willing or able to concede?”, is part of the purpose of this work.

1. Introducción

La evolución ha tocado a nuestras puertas en forma de algoritmos, y no de la manera que se anticipaba en la década de los noventa. En ese entonces, existía una fuerte expectativa en torno a la robótica, y un sueño epifánico se materializaba en varios modelos que pretendían, de algún modo, reemplazar al ser humano en tareas cotidianas que implicaran movimientos o esfuerzos, emulando la movilidad humana. Sin embargo, la ciencia modificó el curso, y la parte cognitiva se convirtió en la nueva meta anhelada. Algunos [1][2][3] sitúan el inicio histórico de la inteligencia artificial en el ámbito de las tareas cognitivas en los juegos ajedrecísticos de revanchas, entre Garry Kaspárov, campeón mundial en ese momento, y la máquina desarrollada por IBM, Deep Blue, en el año 1996, los cuales fueron ganados por esta última. El mundo estalló de asombro, una explosión propagandística se desarrolló en torno al hecho, y una carrera tecnológica fue desatada en función de lograr la cima en este ámbito. La cognición, hasta ese momento vetada para las máquinas y siempre vista desde un velo enigmático, comenzaba a mirarse a través de los chips y lenguaje programático. La capacidad de pensar, de resolver, de prever; ahora, se percibía como una meta alcanzable.

La dinámica en torno a la IA se hizo más progresiva y en pocos años comenzó a integrarse a varias ramas que tenían como perfil la concepción intelectual. La parte creativa de combinar y explorar desde múltiples aristas un argumento podía ser asumida por diversas IA. Las redes neuronales profundas contribuyeron en gran medida a este desarrollo en el apartado cognitivo, además del desarrollo técnico al aumentar las capacidades de procesamiento de datos. Si bien durante la demostración de ajedrecística entre IBM y Garry Kaspárov en 1996 se centraba en demostrar las capacidades de cálculo de las máquinas, ya para el año 2010 la intención se centraba en emular la forma en la que trabaja la inteligencia humana. Las redes neuronales profundas alcanzaban a reconocer

patrones y aprender de ellos para llegar a nuevos resultados. En el ámbito de la arquitectura conceptual, estos aspectos están redefiniendo la manera en que nos enfrentamos a la resolución de problemas. La variación en el concepto del uso de las herramientas que trascienden lo mecánico a tareas que pueden comprender la simulación del pensamiento humano ha traído consigo la modificación de la guía de trabajo del pensamiento arquitectónico. Aquí se cruzan varios conceptos filosóficos que dan cuerpo y estructuran el camino conceptual de una obra arquitectónica, los cuales son la base dialéctica de este artículo. De modo que, serán ampliados y conectados con los consecuentes cognitivos desarrollados en la fase conceptual arquitectónica. *Technê, Epistêmê, Frónesis, Sofía, Logos y Nous* son los principios filosóficos que unidos a los procesos inferenciales (deducción, inducción y abducción) y las formas creativas (exploratoria, combinatoria y transformacional) conforman el proceso intelectual a exponer, permitiéndonos entender cómo la IA está cambiando el proceso conceptual arquitectónico desde una perspectiva filosófica y técnica.

2.0 Construcción conceptual de la Matriz Epifilogénica

La manera en que estos conceptos convergen en el ámbito de la IA y la arquitectura, en su fase conceptual, configura un sistema complejo que da lugar a tareas cognitivas que persiguen idear la realidad. Una actividad profundamente compleja que pretende, a través de la simulación, reflejar una realidad posible. Un desafío que oscila entre dos visiones en conflicto, la de Platón, que advertía sobre los peligros de las representaciones erróneas, mientras que Aristóteles veía valor en narrar lo que podía ser posible [4]. En este contexto, las representaciones conceptuales arquitectónicas fluctúan, más aún, cuando está implícita la IA como herramienta para su desarrollo, por su habilidad de maximizar, como toda herramienta, las capacidades humanas, esta vez desde la esfera cognitiva. Bajo esta premisa se establecerá una relación argumental que atraviesa estos con-

ceptos para concluir con una matriz epifilogenética que se ampliará a través de definiciones que van conectando cada uno de estos vértices. La importancia de esta matriz es conceder el peso correspondiente a las relaciones, en la fase conceptual arquitectónica, en el empleo de IA, entre algoritmos y pensamiento humano. Desintegrar la composición genética de esta relación bajo la premisa filosófico-inferencial-creativa para identificar los entes que afectan con mayor o menor influencia esta integración nos permitirá saber la relación evolutiva entre algoritmo y ser humano en la tarea cognitiva a desarrollar en la etapa conceptual arquitectónica.

2.1 Creatividad, inferencias e Inteligencia Artificial (IA)

El desarrollo de la inteligencia artificial ha permitido que los arquitectos exploren con mayor soltura diversas formas creativas enunciadas por Margaret Boden, las cuales se dividen en tres tipos según la forma en que estas se desarrollan: exploratoria, combinatoria y transformacional [5]. La creatividad exploratoria es la más común de todas y menos arriesgada; sus pretensiones no son disruptivas y buscan comportarse dentro los cánones aceptados por una época, optimizando formas ya conocidas y ajustándolas a nuevas demandas, pero siempre sobre la base de reglas o estilos preestablecidos. A criterio de Margaret, la creatividad exploratoria implica la búsqueda sistemática dentro del marco conceptual previsto y probado, sin rebasar sus límites [5]. En este sentido, la IA, en la manera en que se construye hoy, se mueve en sus aguas, sacando provecho al gran cúmulo de datos que existe en las redes. Steven Pinker refuerza esta idea, refiriendo que este tipo de creatividad se desempeña de forma óptima en las herramientas cognitivas que permiten a los individuos estructurar y ordenar el espacio de trabajo en el que se están desarrollando [6].

En cambio, en la creatividad combinatoria, que tiene su génesis en la exploratoria, pretende retar las formas preexistentes mezclando elementos en busca de algo novedoso, el manierismo

en las artes y la arquitectura es resultado de este proceder. Aquí, la IA, en una especie de ruleta rusa, puede llegar a combinar formas y estilos que no hayan sido probados con anterioridad, logrando algo novedoso, pero todavía enmarcado o sujeto a las reglas aceptadas. Un ejemplo de este proceder fue la famosa primera jugada de Alfa Go, al enfrentarse al campeón del mundo, desafiando estrategias milenarias en el juego del Go. Por más que la validez de este resultado se haya obtenido en un escenario donde las reglas y su alcance estaban claramente definidos, su aplicabilidad en contextos con mayor complejidad o incertidumbre permanece en cuestión. En el ámbito donde se desarrolla la vida real, las implicaciones psicosociales complejizan el escenario donde se desarrollan los acontecimientos y donde las reglas del “juego” se desdibujan. El reto en este proceder es la pertinencia de los resultados; de poco o nada sirve lograr una combinación novedosa si no es pertinente con lo que se persigue. Sobre la arquitectura, por ser una actividad compleja, recaen implicaciones sociales, económicas y técnicas que vulneran cualquier intento casuístico sin un respaldo conceptual fuerte. Por eso es tan necesario en ese juego de azar, el juicio humano, pues, sí vamos al punto genuino de la creatividad combinatoria; a criterio de Edward de Bono, va más allá de un proceso casuístico. Se trata de un proceso que implica seleccionar y organizar patrones novedosos [7].

De otro lado, la creatividad transformacional, ese gesto copernicano y disruptivo que va generando nuevas reglas y estilos, aún no ha sido alcanzado por la IA. Separarse de los sistemas de datos y generar otros totalmente nuevos no ha podido ser asumido por los algoritmos al día de hoy. La flexibilidad creativa que requiere el pensamiento transformacional, implica ir más allá de la manipulación de reglas, es preciso reinventarlas [7]. Erik Larsson, en su libro “El mito de la inteligencia artificial: Por qué las máquinas no pueden pensar como nosotros lo hacemos”, aborda el tema sobre la base de los procesos inferenciales, advirtiendo que, aunque la IA ha avanzado mucho en los últimos años, todavía no ha logrado emular la abducción [8].

A criterio de Charles Peirce, esta es la forma más creativa de las inferencias, ya que permite generar nuevas hipótesis a partir de datos incompletos o ambiguos [9]. En el caso de la arquitectura conceptual, la inferencia abductiva es la clave para desarrollar nuevas soluciones radicales. La intuición y el contexto son esenciales para captar el espíritu del lugar, elementos que la IA no puede codificar plenamente. A criterio de Larsson, aunque la IA es formidable en el procesamiento de grandes cantidades de datos, su incapacidad de generar nuevas hipótesis o teorías mediante la abducción limita su potencial creativo [8]. Por ende, la manifiesta debilidad actual de la IA en los conceptos de la creatividad transformacional impone un límite en la búsqueda de soluciones contextuales coherentes.

2.2 Technê, Epistêmê y Frónesis: Nexo entre Técnica, Conocimiento y Sabiduría Práctica.

Ahora bien, si se indagan las génesis filosóficas en términos creativos, encontramos una búsqueda constante en equilibrar definiciones como *Technê* (la habilidad técnica de producir materiales) y *Epistêmê* (conocimiento teórico) como expresión relacional entre técnica, conocimiento y sabiduría práctica. Christopher Alexander, en su libro "Tres aspectos de Matemática y Diseño", expresa que los principios técnicos y las matemáticas son esenciales para crear formas arquitectónicas que armonicen con las leyes de la naturaleza [10]. La *Technê* es manifiesta y enriquecida por la capacidad de la IA en el procesamiento de datos y la aplicación de normas técnicas de manera más eficiente, logrando soluciones que tienen el potencial de convenir con el entorno. La gran cantidad de datos que puede llegar a procesar la IA fortalece la *Technê*, maximizando la eficiencia y la estética. No obstante, Christopher Alexander, más adelante en el trabajo citado, ajusta el criterio y hace énfasis en la capacidad humana de percibir y comprender el impacto emocional y estético de las posibles formas combinadas por los algoritmos. Al margen de que las máquinas tienen la capacidad de optimizar formas

estructurales, los diseñadores deben basarse en principios estéticos y de uso humano para lograr una coherencia espacial adecuada [10].

Desde otra perspectiva, y consolidando el peso conceptual de una obra arquitectónica, Epistêmê representa el conocimiento profundo que sustenta la práctica arquitectónica. En la arquitectura, no solo es esencial la expresividad emocional (el genio artístico) o la técnica en sí misma; también es necesario comprender el cómo y el porqué de construir de una manera específica y determinada." Los conocimientos puestos en práctica y canalizados en la experiencia colectiva están presentes en cada paso a dar en la concepción arquitectónica. La inducción, tal como ha funcionado en la ciencia hasta ahora, permite generalizar a partir de datos específicos, extrapolando principios puestos en práctica a casos futuros. En este punto, la IA fluye en su entorno; una vasta base de datos le permite extraer diversas experiencias acumuladas y registradas para, a partir de ellas, consolidar hipótesis. Mario Carpo manifiesta la idea de la ciencia de la búsqueda como alternativa. La posibilidad que nos brindan los algoritmos de búsqueda, optimización y simulación nos permite ir más allá de lo conocido en persona para extender nuestra visión. A juicio de Carpo, el poder que ha alcanzado la computación permite una nueva clase de ciencia orientada a la búsqueda algorítmica, más valiosa que el conocimiento basado en la deducción matemática tradicional [11].

No obstante, esta presunta ciencia de la búsqueda, y la manera inductiva de aplicarla, recae en un mal arrastrado desde que la ciencia moderna caló en el desarrollo humano; en realidad, no nos ha ido tan mal. Pero, de algún modo, al generalizar principios extraídos de casos específicos, asumimos la recursividad histórica, dando por hecha una carencia evolutiva. Larsson abunda sobre el tema y las implicaciones que trae consigo el uso inapropiado y dependiente de la IA, partiendo del concepto sobre el que se basa para funcionar [8]. Según Larsson la dependencia de los datos para generar predicciones futuras establece un límite donde la incertidumbre se revela. La capacidad humana

de generar inferencias abductivas en escenarios cambiantes y en operación, donde interviene el comportamiento psicosocial humano, no ha podido ser asumida por la IA. A pesar de la accesibilidad de los métodos inductivos por parte de la IA, la abducción que permite generar nuevas hipótesis sigue ausente en su proceder [8].

Justamente en este apartado entra la sabiduría humana, la capacidad de tomar decisiones correctas en situaciones particulares. La *Frónesis* es un principio filosófico esencial en la fase conceptual. Encontrar las particularidades de cada entorno donde se va a desarrollar la obra arquitectónica y revelar lo que se esconde, lo dudoso, ambiguo; desentrañar la singularidad de un lugar, ya sea narrado por la gente o por la naturaleza, es la esencia conceptual de cualquier obra arquitectónica. Y si bien la arquitectura, a fuerza, tiene que ser hija de su tiempo, de algún modo, tiene que pretender revelarse ante él y trascender la época. Lograr un pacto entre pasado y futuro para conciliar un presente no puede ser de otra manera que bajo el hilo conductor de la *Frónesis*. Remarcando esta idea, Dulce María Barrios enfatiza la importancia de trascender los principios técnicos o teóricos y responder a las demandas sociales, culturales y emocionales del usuario [12], pudiendo agregar la confluencia histórica del individuo. Aquí el arquitecto juega un papel crucial frente a la debilidad de la IA para evaluar dimensiones éticas y emocionales del diseño y rebasar las codificaciones preestablecidas por la IA que extrae datos sin interpretación significativa. De tal manera que la integración del contexto social y cultural emanada desde la *Fronesis* solo es posible atender de forma sensible y ética desde la parte humana.

2.3 Sofía, Logos y Nous: Sabiduría, Perspicacia e Intuición en la fase conceptual arquitectónica.

La integración entre filosofía y teoría en la fase conceptual arquitectónica está sobre la base de la sabiduría reflexiva o lo que pudiera-

mos llamar en términos conceptuales filosóficos, Sofía. Esencial para guiar el camino en los procesos complejos que transcurren o median entre la parte técnica y la parte emocional.

La inevitable integración entre la incertidumbre y la complejidad inherente a la realidad empuja a una actividad profundamente reflexiva que aboga por encontrar los puntos de entendimientos humanos con sus diferentes aristas. Edgar Morin en su texto “Introducción al pensamiento complejo” subraya la complejidad de la mente humana al expresar la capacidad de la misma de integrar diferentes experiencias y pensamientos dentro de un todo, al tiempo que se diversifica en múltiples pensamientos y perspectivas, permitiendo afrontar una diversa gama de problemas situacionales. Agregando, además, la evaluación constante de opuestos y contrastes, dígame el bien y el mal [13]. Unidad, diversidad y dualidad se amalgaman en un solo proceso de carácter simultáneo, incapaz, al día de hoy, de ser emulado por los algoritmos.

Como hemos visto, la IA puede ayudar a procesar una ingente cantidad de datos que ayudan a visualizar con mayor claridad una determinada problemática, pero la raíz del asunto no está en los datos en sí, sino en la interpretación de los mismos. La capacidad de reflexionar sobre ellos y darle cuerpo conceptual a una idea sobre la información proporcionada es una actividad que no ha podido ser replicada por las máquinas. La conciencia sobre el impacto social y cultural del diseño sigue siendo una tarea profundamente humana, ligada a la *Sofía*.

Ahora bien, en cuanto a *Logos*, la raíz del pensamiento lógico, es aplicada a la concepción arquitectónica desde sus primeras etapas para alcanzar conclusiones válidas a partir de premisas o información disponible. En esta secuencia se entrelazan los tres tipos de inferencias. En este camino, el uso de la IA ejerce una influencia válida en la identificación de patrones que a través de los algoritmos y principios matemáticos ayudan a generar formas y estructuras. Mario Carpo argumenta que la IA ha cambiado la forma en que los arquitectos ejercen la creatividad y apoya su criterio en el diseño generativo, donde las secuencias de programación no solo

automatizan procesos, sino que intervienen en la configuración de geometrías complejas [11].

La evidente conexión entre logos y la inferencia

No obstante, el más críptico de los principios filosóficos, el Nous, o intuición, es fundamental para lograr conectar los estímulos provocados por la conformación del entorno y los sentidos.

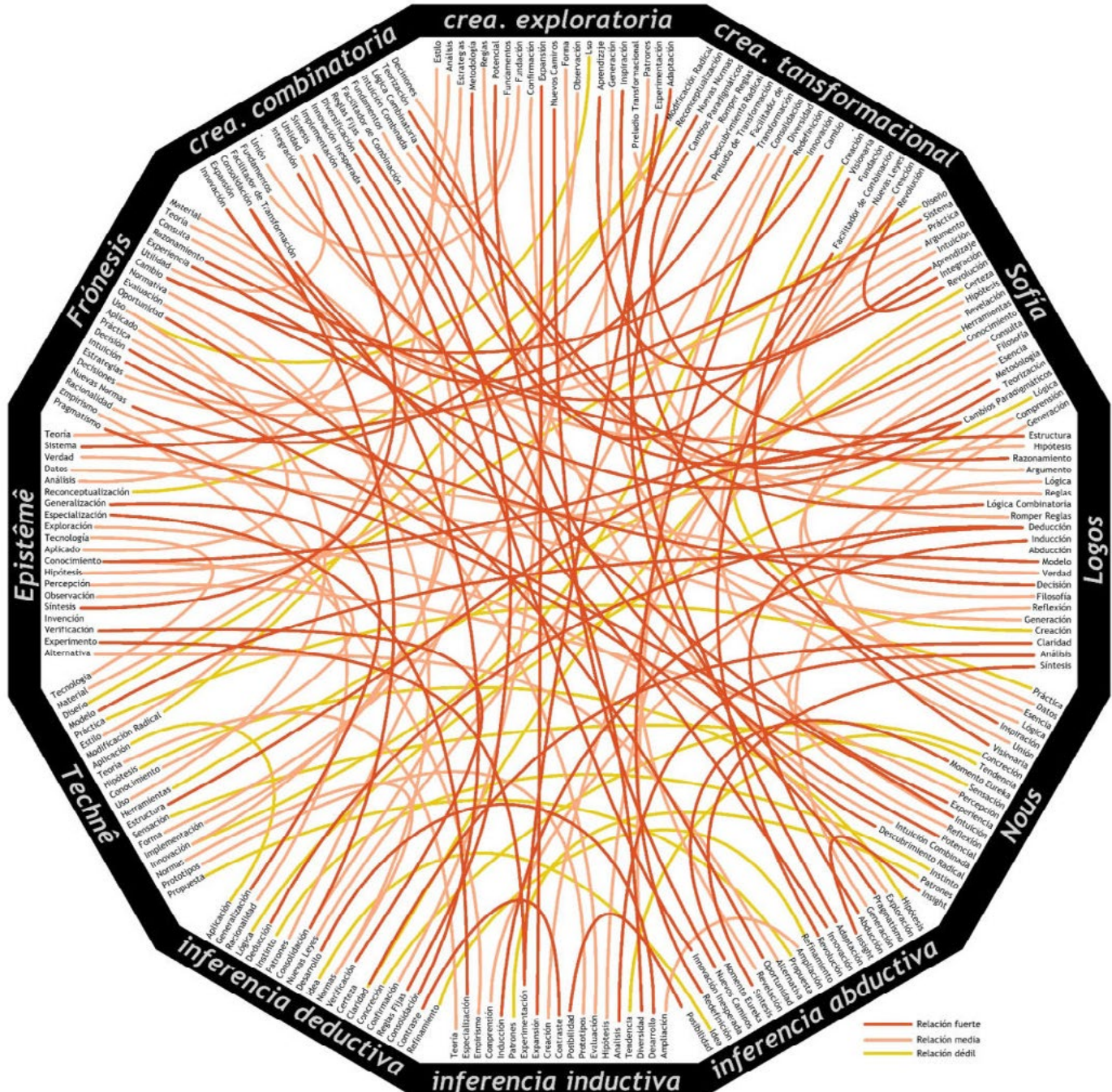


Fig. 1 Matriz Semántica (Elaboración Propia)

deductiva es manifiesta, expresada en la generalización de principios en casos particulares, pudiendo alcanzar una optimización del diseño arquitectónico.

Juhani Pallasmaa destaca la importancia de este nexo entre arquitectura y experiencia sensorial, con el propósito de evocar emociones multifacéticas y simultáneas [14]. Aunque la IA es muy

fuerte en Logos, generando patrones, registrando y estructurando datos sensoriales, la intuición humana sigue siendo imprescindible para crear diseños que vibren emocionalmente con el habitante. La abducción como paso primogénito de la creatividad humana está muy ligada a la intuición, ya que esta es la clave para generar ideas disruptivas e innovadoras, sin perder la coherencia contextual que debe requerir una obra arquitectónica.

3.0 Resultados y conclusión: Matriz Epifilogenética (construcción filosófica-creativa-inferencial)

Una vez realizado este proceso de análisis y ajustes entre los conceptos Technê, Epistêmê, Frónesis, Sofía, Logos y Nous vinculado a los

otro. Todo ello tomando como medio de integración, la confluencia operacional entre algoritmos y pensamiento humano.

Bajo estas premisas, se buscaron las palabras más adecuadas, que, en función de su significado y uso, describieron una conexión más expedita entre cada uno de los conceptos explorados. En la figura 1 (Fig. 1), de elaboración propia, queda reflejada esta interconexión semántica que pretende encontrar la forma genética y evolutiva, visto desde los conceptos explorados en la fase metodológica.

A partir de esta conexión semántica graficada en la figura 1 (Fig. 1), se establecieron tres tipos de evaluaciones cualitativas relacionadas en la figura 2 (Fig. 2), tales como: relevancia, ¿Cuán relevante es el vínculo entre dos conceptos para el desarrollo en la fase conceptual arquitectónica?; frecuencia, ¿Con qué frecuencia se es-

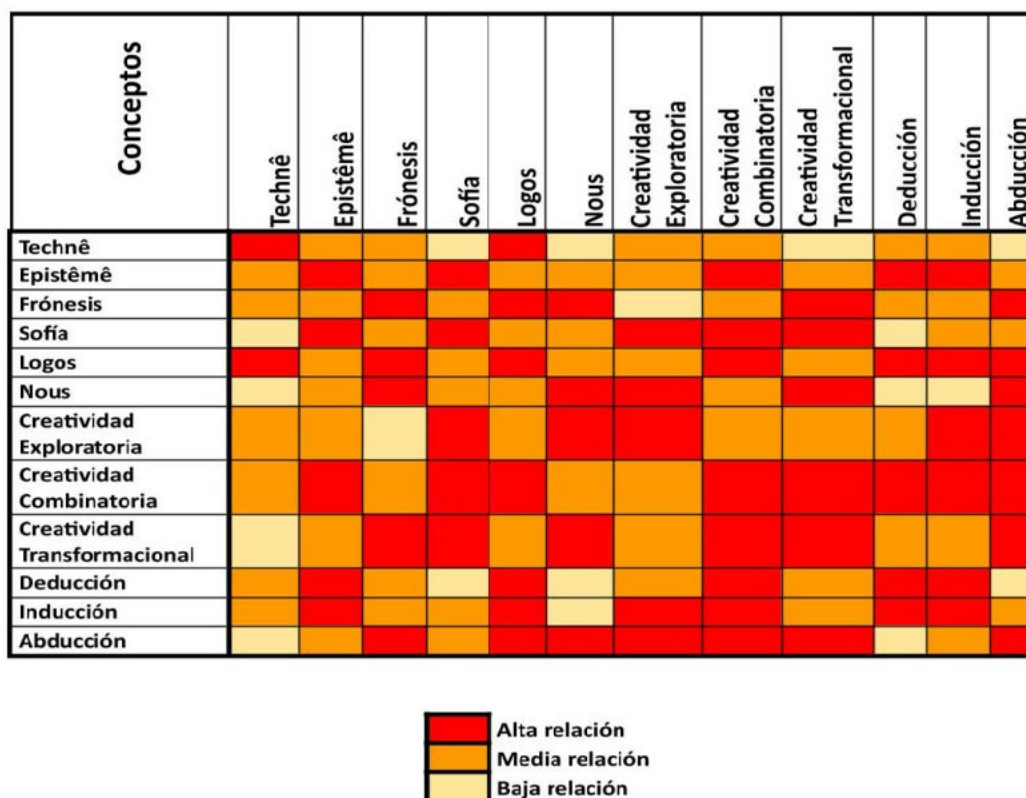


Fig. 1 Matriz Epifilogenética (Elaboración Propia)

procesos inferenciales y creativos, se puede llevar a cabo una evaluación y desarrollo de la transmisión de conocimiento de un vértice a

para que estos conceptos interactúen?; impacto, ¿Cuál es el impacto potencial en el desarrollo de nuevas ideas o soluciones? Bajo este criterio y teniendo en cuenta lo desarrollado en la fase

metodológica, se les fue asignada una escala valorativa: Alta relación, media relación y baja relación; con el propósito de identificar las conexiones más críticas o prometedoras.

4. Resultados y discusión

Conclusiones

Sobre el análisis desarrollado en este trabajo podremos establecer una mejor dinámica colaborativa entre máquinas generadoras de contenido y el raciocinio humano. Los diseñadores implicados en la fase conceptual arquitectónica podrán centrarse en áreas claves de integración para la innovación o resolución de problemas, integrando nuevas tecnologías o metodologías de trabajo sin perder la esencia humana.

Al día de hoy son varias IA que se están alineando en este proceso. Poder distinguir hasta donde se puede llegar con ellas, sin perder de

vista la significancia del resultado, podría ahorrar tiempos y acortar caminos hacia un resultado. Esta herramienta nos ofrece un marco para combinar de manera eficiente las capacidades técnicas que nos brinda la IA y el juicio crítico, reflexivo y creativo del ser humano, mejorando de esa forma la posible inclusión de forma eficaz en la fase conceptual arquitectónica.

Referencias

- [1] Chess.com, "Kasparov vs. Deep Blue: The Match That Changed History," Chess.com. [Online]. Available: <https://www.chess.com/article/view/deep-blue-vs-kasparovhttps://www.kasparov.com/kasparov-vs-deep-blue-the-chess-match-that-changed-our-minds-about-ai-gizmodo-april-9-2023/> [Accessed: Sep. 25, 2024].
- [2] "Garry Kaspárov: la Inteligencia Artificial y la creatividad humana - Magis". Magis. Accedido el 27 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible:<https://magis.iteso.mx/nota/garry-kasparov-la-inteligencia-artificial-y-la-creatividad-humana/>
- [3] A. Freeland. "Kasparov vs. Deep Blue - Blog de Tekkie Uni". TekkieUni - Coding for Kids. Accedido el 27 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://tekkieuni.com/es/blog/kasparov-vs-deep-blue/>
- [4] Linda N. Groat y David Wang, Architectural Research Methods, 2a ed. Canada: Wiley, 2013.
- [5] M. A. Boden, Creativity and Art: Three Roads to Surprise. Oxford Univ. Press, 2012.
- [6] S. Pinker, How the Mind Works. New York, NY, USA: W. W. Norton & Company, 1997.2.
- [7] E. de Bono, Serious Creativity: Using the Power of Lateral Thinking to Create New Ideas. New York, NY, USA: HarperBusiness, 1992.
- [8] E. J. Larsson, El mito de la inteligencia artificial: Por qué las máquinas no pueden pensar como nosotros lo hacemos, 1ª ed. Madrid, España: Shackleton Books, 2022.
- [9] GENOVA, Gonzalo. ""Charles S-Peirce: La lógica del descubrimiento"". Cuadernos de Anuario Filosófico. Serie Universitaria. 1997, volumen XLV, pág. 1-82.
- [10] C. Alexander, Tres aspectos de Matematica y diseño y la estructura del medio ambiente, 2a ed. Barcelona: Tusquets, 1980.
- [11] M. Carpo, The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence. Cambridge, MA: MIT Press, 2017.
- [12] D. M. Barrios, "Hacia una filosofía de la arquitectura", AEDIFICARE, vol. 1, n.º 1, pp. 11–75, 2005.
- [13] E. Morin, Introducción al pensamiento complejo, 1st ed. Barcelona, España: Editorial Gedisa, 1990.
- [14] J. Pallasmaa, Los ojos de la piel: La arquitectura y los sentidos. Barcelona: Gustavo Gili, 2006.

Revisión de Técnicas de Aprendizaje Automático en el Procesamiento de señales Mioeléctricas

A Review of Machine Learning Techniques in Myoelectric Signal Processing

Bacilio Díaz, Carlos Alberto
Takacs, Andras

*Facultad de ingeniería **

*Universidad Autónoma de Querétaro***

Santiago de Querétaro, México

Correo electrónico: cbacilio03@alumnos.uaq.mx
andras.takacs@uaq.edu.mx

Palabras clave: IAR, SVM, señales mioelectricas, Lógica difusa, procesamiento.

Resumen- El procesamiento de señales mioelectricas nos permite mejorar el analisis y las aplicaciones. En este artículo, revisamos los avances con respecto al procesamiento de señales mioeléctricas centrando la información en la aplicación de máquina de vectores de soporte en combinación con otros métodos y análisis, así como la lógica difusa y el análisis discriminante lineal, con aplicaciones en movimientos musculares. Las señales mioelectricas en conjunto con la inteligencia artificial, nos permite predecir un conjunto de movimiento que puede aplicarse a la rehabilitación o movimientos de prótesis. En esta revisión destaca la precisión de analisis de señales así como la precisión de predicción de movimientos a traves de sistemas difusos. Finalmente se discute las perspectivas de implementaciones futuras en la investigación y en el desarrollo de tecnologías.

Keywords: IAR, SVM, Myoelectric signal, Fuzzy Logic, Processing.

Abstract- Myoelectric signal processing allows us to improve analysis and applications. In this article, we review the advances regarding myoelectric signal processing focusing the information on the application of support vector machine in combination with other methods and analysis, as well as fuzzy logic and linear discriminant analysis, with applications in muscle movements. The myoelectrical signals in conjunction with artificial intelligence, allows us to predict a set of movement that can be applied to rehabilitation or prosthetic movements. This review highlights the accuracy of signal analysis as well as the accuracy of motion prediction through fuzzy systems. Finally, the prospects for future implementations in research and technology development are discussed.

1. Introducción

El procesamiento de señales mioeléctricas (sEMG) ha adquirido gran relevancia en áreas como la rehabilitación y el control de prótesis debido a su capacidad para traducir las señales eléctricas generadas por los músculos en

información útil para la interpretación de los movimientos humanos. Estas señales, producidas durante la contracción muscular, son captadas mediante sensores no invasivos, lo que las convierte en una herramienta clave para el desarrollo de dispositivos médicos avanzados que mejoran la calidad de vida de personas con discapacidades físicas.

Las sEMG son producidas por el movimiento de un músculo del cuerpo humano. La extremidad, genera una serie de señales mioeléctricas cuando el músculo se contrae y pueden ser percibidas por sensores superficiales, generando un diferencial de potencial de 5 a 250 μV durante una contracción motora [1].

Uno de los desafíos más importantes en el análisis de señales sEMG es la clasificación precisa de los movimientos, especialmente cuando se busca controlar una prótesis o diseñar planes de rehabilitación personalizados. En este sentido, las técnicas de aprendizaje automático han emergido como herramientas poderosas para mejorar la exactitud y eficiencia del procesamiento de estas señales, ofreciendo soluciones más robustas y adaptativas.

Se eligieron técnicas específicas de aprendizaje automático, como las máquinas de vectores de soporte (SVM), la lógica difusa y el análisis discriminante lineal, debido a su capacidad para manejar la complejidad inherente de las señales sEMG, así como su aplicabilidad en diferentes escenarios clínicos. Estas técnicas no solo permiten clasificar los movimientos musculares, sino también predecirlos con mayor precisión, lo que tiene un impacto directo en la efectividad de las prótesis y los programas de rehabilitación.

El objetivo de esta revisión es ofrecer una comparación exhaustiva de estas técnicas, evaluando sus ventajas y limitaciones en el contexto del procesamiento de señales mioeléctricas. A través de este análisis crítico, se espera proporcionar información relevante para la comunidad científica y médica, además de proponer futuras direcciones para mejorar los sistemas de control de prótesis y rehabilitación muscular.

2. Metodología

La selección de estudios revisados se basó en su relevancia y aportes en el campo del procesamiento de señales mioeléctricas. Se incluyeron estudios que emplean técnicas de filtrado, algoritmos de clasificación y modelos híbridos. A continuación, se describen las categorías principales en las que se agrupan estas técnicas.

a) Técnicas de preprocesamiento.

Las técnicas de preprocesamiento son esenciales para eliminar el ruido y capturar una señal sEMG de alta calidad, fundamental para aplicaciones de clasificación de gestos y control de prótesis. Los métodos de filtrado utilizados en los estudios incluyen:

Filtro Notch y Filtro Butterworth: En varios estudios ([2], [3]), el filtro notch (en 50 o 60 Hz) fue utilizado para eliminar ruido eléctrico, mientras que el filtro Butterworth, con un paso de banda de 15 a 500 Hz, permitió capturar variaciones rápidas en la actividad muscular, lo cual es clave para la precisión en sistemas de prótesis.

Transformada Wavelet y Entropía de Kraskov: En la referencia [2], se emplearon la transformada wavelet y la entropía de Kraskov para filtrar señales sEMG muestreadas a 1 kHz, logrando una captura precisa de señales afectadas por el movimiento del sensor y artefactos.

Filtro de Banda Elíptico: En el estudio [4], se empleó un filtro de banda elíptico entre 10 y 500 Hz, en combinación con un notch de 60 Hz, para mejorar el control de ruido en señales mioeléctricas de baja frecuencia, común en estudios de actividad de baja intensidad.

Filtrado de Frecuencia Alta: Para estudios que requieren un alto nivel de detalle en las señales musculares, como la referencia [5], se utilizó un filtro de paso de banda entre 20 y 450 Hz con una tasa de muestreo de 2000 Hz, lo cual mejoró la captura de información precisa en las señales.

b) Algoritmos de clasificación.

Los algoritmos de clasificación convierten las señales preprocesadas en datos que pueden ser interpretados para controlar movimientos. En la Tabla 1 se presentan algunos de los algoritmos revisados:

Tabla 1 Tabla comparativa de los algoritmos de clasificación de señales mioeléctricas. Fuente: Elaboración propia.

Ref	Algoritmo de inteligencia artificial.	Aplicación	Desempeño y limitaciones
[5]	SVM + Fisher Score	Clasificación de señales	Alta precisión (>98%), pero alto costo computacional
[3]	SVM + Cruces por cero	Identificación de patrones	Incremento del 40% en precisión, pero sensible al ruido
[6]	SVM + Análisis de Componentes Principales	Predicción de gestos complejos	Precisión >95%, pero procesamiento lento
[7]	SVM + KNN	Detección y control de prótesis en tiempo real.	Precisión del 95.4%; coste reducido; alta precisión en gestos complejos de mano

c) Modelos híbridos.

Los modelos híbridos integran diferentes técnicas para maximizar la precisión y

eficiencia. Un ejemplo destacado es la combinación de lógica difusa y redes neuronales de memoria a largo y corto plazo (LSTM) en el estudio [6], logrando una precisión de 96.7% en la predicción de movimientos. Estos modelos también permiten una mayor flexibilidad al adaptarse a diferentes tipos de señales y aplicaciones, como se observa en el caso de [8], donde la lógica difusa mejora la estabilidad en los movimientos predichos.

3. Resultados y discusión

El uso de la máquina de vectores de soporte (SVM) en conjunto con técnicas como el método de cruces por cero ha mostrado una precisión superior al 90%, con mejoras del 40% en comparación con métodos tradicionales, y tiempos de procesamiento rápidos (7.69 μ s) [3].

En contraste, el uso de SVM con Fisher Score alcanzó una precisión superior al 98%, mostrando buenos resultados en la mayoría de los grupos evaluados [5]. Los estudios que combinaron SVM con análisis de componentes principales también mostraron mejoras en la clasificación, aunque con aumentos marginales en precisión y tiempos de procesamiento más largos [6].

Los sistemas difusos han mostrado una precisión superior al 90% en la predicción de movimientos de manos y brazos, destacando por su estabilidad en movimientos complejos [8]. La combinación de lógica difusa con redes neuronales de memoria a corto y largo plazo (LSTM) alcanzó una precisión del 96.7% para movimientos de apretar y soltar la mano [9], lo que los hace ideales para el control de prótesis.

El análisis discriminante lineal mostró una correlación del 0.87 entre el desempeño en vivo y los datos de base, validando su eficacia

en ciertos contextos [2]. Sin embargo, su aplicación en tiempo real es limitada.

4. Conclusiones

Esta revisión proporciona una visión detallada de las técnicas de inteligencia artificial aplicadas al procesamiento de señales mioeléctricas (sEMG), resaltando su potencial en el desarrollo de sistemas de rehabilitación y prótesis. A continuación, se presenta una síntesis de las técnicas recomendadas y sus aplicaciones:

- **Máquina de Vectores de Soporte (SVM):** Ideal para la **clasificación precisa** de gestos en sistemas de rehabilitación que requieren alta precisión, como en movimientos específicos de la mano. Este método es adecuado para aplicaciones con limitaciones de procesamiento y que no necesiten respuesta en tiempo real.
- **SVM + Fisher Score o Cruces por Cero:** Recomendado para aplicaciones que requieren **identificación precisa de patrones de movimiento** y con una mayor resistencia al ruido en señales mioeléctricas complejas. Su uso es óptimo en entornos controlados donde se prioriza la exactitud sobre la velocidad.
- **SVM-KNN (Sistema Híbrido):** Este modelo híbrido se recomienda para **prótesis robóticas en tiempo real**, combinando precisión y rapidez a bajo costo. Su capacidad para clasificar gestos de mano lo hace ideal para prótesis de miembros superiores, siendo una opción accesible y efectiva para personas en países en desarrollo.
- **Lógica Difusa y Redes Neuronales LSTM:** Apropiado para **control de prótesis en movimientos complejos**.

Esta combinación es especialmente eficaz en situaciones que requieren una respuesta dinámica y estable, como los movimientos de flexión y extensión en prótesis de brazos o piernas.

- **Análisis Discriminante Lineal:** Útil en **sistemas de clasificación de gestos sEMG** en contextos experimentales donde no se requiere una respuesta en tiempo real, pero se necesita un alto nivel de correlación y consistencia con datos en vivo.

Contribuciones de la Revisión

Este análisis de técnicas de IA aplicadas al procesamiento de sEMG contribuye al desarrollo de tecnología de rehabilitación al:

1. **Ofrecer un marco comparativo** de técnicas avanzadas, permitiendo a los desarrolladores y clínicos elegir métodos que equilibren precisión, velocidad y costo según las necesidades del paciente.
2. **Identificar aplicaciones específicas** para cada técnica, guiando el desarrollo de prótesis accesibles, sistemas de rehabilitación personalizados y dispositivos médicos que puedan implementarse en tiempo real o en escenarios clínicos controlados.
3. **Proponer modelos híbridos** como SVM-KNN para lograr prótesis de bajo costo con alto rendimiento, que puede ser especialmente útil en regiones con recursos limitados.
4. **Fomentar investigaciones futuras** en técnicas híbridas y redes neuronales avanzadas que puedan adaptarse a señales mioeléctricas más complejas, ampliando el uso de IA en prótesis de extremidades inferiores.

Este enfoque integral impulsa la creación de tecnologías de rehabilitación que mejoran la calidad de vida de los pacientes y promueve un avance significativo hacia soluciones accesibles y eficaces en el campo de la bioingeniería y la inteligencia artificial aplicada.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías por los recursos otorgados y a la Universidad Autónoma de Querétaro por los recursos otorgados.

Referencias

- [1] J. Correa, E. Morales, J. Huerta, J. González y C. Cárdenas, «SEMG Signal Acquisition System for Muscle Fatigue Detection,» *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, vol. 37, nº 1, pp. 17-27, 2016.
- [2] R. Suppiah, N. Kim, A. Sharma y K. Abidi, «Fuzzy inference system (FIS) - long short-term memory (LSTM) network for electromyography (EMG) signal analysis,» *Biomedical Physics & Engineering Express*, vol. 8, nº 6, 2022.
- [3] T. e. al, «A Study of Computing Zero Crossing Methods and an Improved Proposal for EMG Signals,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 8783-8790, 2020.
- [4] T. e. al, «Support Vector Machine-Based EMG Signal Classification Techniques: A Review,» *Applied sciences*, vol. 9, nº 20, 2019.
- [5] T. e. al, «Feature set to sEMG classification obtained with Fisher Score,» *IEEE Access*, vol. 12, pp. 13962-13970, 2024.
- [6] N. e. al, «An sEMG Signal-based Robotic Arm for Rehabilitation applying Fuzzy Logic,» *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 14, nº 3, pp. 14287-14294, 2024.
- [7] F. e. al, «EMG Controlled Bionic Robotic Arm using Artificial Intelligence and Machine Learning,» *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, pp. 334-229, 2020.
- [8] D. Toledo, M. Martínez, R. Gómez, W. Paredes y R. Juvenal, «A Study of Movement Classification of the Lower Limb Based on up to 4-EMG Channels,» *Electronics*, vol. 8, nº 3, 2019.
- [9] L. e. al, «Evaluating User and Machine Learning in Short- and Long-Term Pattern Recognition-Based Myoelectric Control,» *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING*, vol. 29, pp. 777-785, 2021.

Análisis de las características de los electrodos para sistemas de puesta a tierra eléctricos

Analysis of Electrode Characteristics for Electrical Grounding Systems

Navarro Rubio Cesar Augusto¹, Trejo Perea Mario², Ríos Moreno José Gabriel³, Carrillo Serrano

Roberto Valentín⁴

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

cesar451@hotmail.es

Palabras clave: ENE; Ingeniería eléctrica y distribución; Propiedades eléctricas.

Resumen- Este artículo presenta una revisión y análisis de las características, dimensiones y desempeño de varios electrodos de puesta a tierra utilizados en sistemas de puesta a tierra eléctrica. Los electrodos de puesta a tierra son componentes críticos para garantizar la seguridad y eficiencia de los sistemas eléctricos, proporcionando una ruta de baja impedancia para la corriente de falla a tierra. En esta revisión, se analizan y comparan tres tipos principales de electrodos: electrodo de rejilla, electrodos de varilla y electrodos de rejilla con varillas. La comparación se realiza considerando parámetros clave como la resistencia de puesta a tierra, la instalación y el comportamiento en diferentes condiciones de suelo. Los resultados de esta revisión brindan una descripción general completa de las ventajas y limitaciones de cada tipo de electrodo, ofreciendo una guía útil para ingenieros y diseñadores en la selección del electrodo más adecuado según los requisitos específicos del proyecto.

Keywords: ENE; Electrical engineering & distribution; Electrical properties.

Abstract- This article presents a review and analysis of the characteristics, dimensions, and performance of various grounding electrodes used in electrical grounding systems. Grounding electrodes are critical components for ensuring the safety and efficiency of electrical systems, providing a low-impedance path for fault current to the ground. In this review, three main types of electrodes are analysed and compared: Grid Electrode, Rod Electrodes, Grid with Rods Electrodes. The comparison is made considering key parameters such as grounding resistance, installation, and behaviour under different soil conditions. The results of this review provide a comprehensive overview of the advantages and limitations of each type of electrode, offering a useful guide for engineers and designers in selecting the most suitable electrode according to the specific project requirements.

1. Introduction.

Electrical grounding systems play a crucial role in the safety and operation of electrical installations, protecting both equipment and people from potential faults and electric shocks [1][2][3]. A fundamental component of these systems is the grounding electrode,

which provides a connection point between the electrical system and the earth, allowing fault current to flow safely into the ground [4][5][6]. The choice of grounding electrode type can significantly influence the efficiency and effectiveness of the grounding system [7][8][9].

In practice, there are several types of grounding electrodes, each with specific characteristics that make them suitable for different applications and soil conditions. Among the most commonly used electrodes are the following: Grid Electrode [10][11][12][13], Rod Electrodes [11][14][15][16], and a combination of both [10][17]. Each of these electrodes has its own advantages and disadvantages in terms of electrical resistance, ease of installation, and costs.

This review aims to conduct a comparative analysis of three types of grounding electrodes by evaluating their technical characteristics, models, and performance. It focuses on commonly used grounding electrodes, comparing their physical and electrical properties, manufacturing materials, and installation techniques. Key parameters, such as grounding resistance, installation methods, and performance under various soil conditions, will be assessed. Data are presented in tables and graphs to facilitate comparison and critical analysis of each electrode's characteristics. This comprehensive approach also identifies opportunities for addressing challenges in future studies.

The selected parameters are:

1. Grounding Resistance: The capacity of each type of electrode to minimize grounding resistance was evaluated, which is essential to ensure the rapid dissipation of fault current.
2. Installation: The complexity of installing each type of electrode was examined.
3. Behavior Under Different Soil Conditions: The performance of each electrode in various soils was considered.

The structure of the article is organized as follows: Part 1 provides an overview of the topic, highlighting its importance, background, and the contribution that this article is intended to make. Part 2 provides a brief introduction to the most commonly used electrodes in grounding systems. Part 3 summarizes the articles describing the characteristics used in the studies and their results in the form of tables and figures. Part 4 describes the conclusions and discussions of this article, proposes future work, and concludes with bibliographical references.

2. Theoretical considerations

This part is divided into subsections and is intended to offer a concise introduction to grounding systems that employ Grid Electrodes, Rod Electrodes, and Plate Electrodes. The objective is to offer a broader context that facilitates a better understanding of the content.

2.1 Electrical grounding system.

Grounding systems are fundamental components in any electrical installation, as they ensure the safety of equipment and people against electrical faults. These systems provide a controlled path for fault or discharge current to dissipate safely into the ground, minimizing the risk of electric shocks, fires, or equipment damage [3][15]. The effectiveness of a grounding system largely depends on proper design and the correct selection of components, particularly the ground electrodes [1][17].

2.2 Rod Electrodes.

Rod electrodes are one of the most common and widely used types in electrical grounding systems. Their popularity stems from their simplicity, ease of installation, and effectiveness in a variety of soil conditions. These electrodes are typically made of steel coated with copper, which provides them with

a combination of mechanical strength and corrosion protection [11].

Grounding rods are installed vertically in the ground, allowing them to reach deeper soil layers where soil resistivity is generally lower, thus improving the effectiveness of the grounding [14][15][16].

2.3 Grid Electrode.

Mesh or grid electrodes are a robust and effective solution for grounding in electrical installations that require a high level of safety and uniform distribution of fault current [10]. These electrodes consist of a network of buried conductors arranged in a grid or ring shape, covering a large area of the ground. This configuration allows for efficient dispersion of electrical current, significantly reducing grounding resistance and minimizing the risk of hot spots or current concentrations [11].

The mesh or grid provides excellent protection against electrical faults, ensuring that leakage current dissipates safely, even in high-resistivity soils [12][13][18][19].

3. Results

To conduct this review, we used a variety of academic search engines such as IEEE Xplore, Scopus, MDPI, Springer focused on electrodes used in grounding systems, in order to identify the most relevant works in this field.

The following section presents Table 1, which summarizes the comparison of the results of the study on rod electrodes used in grounding systems. This table highlights the geometrical characteristics, resistance values, influence of soil type and provides a clear overview of how rod electrodes behave under various conditions.

Table 1. Comparison of Study Results on Rod Electrode in Grounding Systems.

Reference	Analysis of Results
[14]	A two-layer soil model with rod lengths from 1.2 to 4.8 meters showed that longer rods significantly reduce grounding resistance, proving to be cost-effective.
[15]	The effective length of a vertical electrode is where impulse impedance is minimized, underscoring the need for optimization in grounding designs.
[16]	In soil with a resistivity of $600 \Omega \cdot m$, increasing rod length and radius greatly reduced resistance, highlighting the influence of rod dimensions.
[17]	A two-layer soil model ($84.96 \Omega \cdot m$ and $892 \Omega \cdot m$) demonstrated that a 1.5-meter rod connected to a copper plate can reduce resistance from 46Ω to 14.3Ω .
[20]	A vertical rod (240 mm^2 , 20 meters) in two-layer soil ($120 \Omega \cdot m$ and $160 \Omega \cdot m$) showed that resistance is significantly affected by rod length and soil resistivity.
[22]	A 1.5-meter rod in two-layer soil ($10,000 \Omega \cdot m$ and $1,000 \Omega \cdot m$) yielded a resistance of 331Ω , indicating the complexity of grounding systems in multi-layered soils.
[29]	Vertical rods are more effective than horizontal ones for dissipating current, helping to reduce ground potential rise during faults.
[30]	A comparison of 0.6-meter copper and galvanized steel rods showed galvanized steel provided lower resistance (141Ω) than copper (171Ω), indicating better grounding performance.

Table 2 presents the average resistance values obtained for rod-type electrodes under different conditions. These values have been measured in different soil types, with a single- or double-layer model, which influence the overall performance of the grounding system.

Table 2. Average Resistance Values for Rod-Type Electrodes.

Reference	Electrode type	Average resistance (Ω)
[11]	Rod	43.5725
[14]	Rod	105.6125
[16]	Rod	113.2500
[17]	Rod	46.0000

[20]	Rod	7.6600
[22]	Rod	331.0000
[28]	Rod	31.7333
[30]	Rod	156.0000

The following section presents Table 3, which provides a detailed comparison of the results of studies on grid electrodes used in grounding systems. The geometry and configuration of the system, electrical resistance, current distribution, and grounding efficiency are highlighted.

Table 3. Comparison of Study Results on Grid Electrode in Grounding Systems.

Reference	Analysis of Results
[10]	Compared a copper grid ground electrode and a copper plate ground electrode, both measuring (1 m ² , 1 m depth) with different soil conductivities (0.01, 0.1, 1 S/m). The grid electrode showed slightly higher resistance values.
[11]	The electrical resistance of a 30 m by 20 m grid electrode was found to be lower than that of rod electrodes in both COMSOL and experimental results, indicating better material efficiency.
[12]	A 4 x 4 m square grounding grid with 2 x 2 m grid spacing was simulated using vertical steel rod electrodes in homogeneous soil with a resistivity of 5 Ω·m. The optimized configuration significantly enhanced fault current dissipation.
[18]	An analysis of grounding grids in uniform soil (20 Ω·m resistivity) revealed that reducing grid spacing and increasing surface area lowers resistance, with minor effects from conductor diameter and material.
[21]	A study using various methods found that grid area is the most important factor for grounding resistance, making simple models useful in early design phases.
[25]	Two grounding grids (100 x 100 m and 50 x 50 m) buried at 0.8 m in soil (200 Ω·m resistivity) emphasized the need for careful design of external grid distance and area for cost-effective solutions.
[28]	Combining a vertical rod with a grid provides a low-impedance path and uniform ground potential distribution, as shown through multiple analytical methods.
[29]	Evaluating grid configurations (triangular, rectangular, L-shaped, T-shaped) revealed the L-shaped grid had the lowest resistance (0.292 Ω using IEEE and 0.195 Ω using FEM), highlighting the importance of selecting the right configuration for effective grounding.

Table 4. Average Resistance Values for Grid-Type Electrodes.

Reference	Electrode type	Average resistance (Ω)
[10]	Grid	24.3700
[11]	Grid	1.1950
[19]	Grid	0.0472
[21]	Grid	2.3770
[23]	Grid	3.8200
[25]	Grid	0.9606
[26]	Grid	0.2660
[27]	Grid	0.0970
[29]	Grid	0.5250

Table 4 shows the average resistance values of grid-type electrodes used in grounding systems. This table focuses exclusively on the design of grid electrodes and their corresponding resistance measurements. The data provide a clear indication of the typical resistance levels that can be expected from grid-type configurations, offering a useful reference for evaluating their performance in different grounding applications.

Table 5 presents average resistance values for grid with rods-type electrodes. This table specifically highlights the performance of this combined electrode design, which integrates both grid and rod components to improve grounding efficiency.

Table 5. Average Resistance Values for Grid with Rods-Type Electrodes.

Reference	Electrode type	Average resistance (Ω)
[12]	Grid with rods	0.2828

[18]	Grid with rods	2.3080
[19]	Grid with rods	0.0332
[28]	Grid with rods	27.6000

Table 6 provides a comparison of the results of the study on grid and rod electrodes used in

Table 6. Comparison of Study Results on Grid with Rods Electrodes in Grounding Systems.

Reference	Analysis of Results
[11]	A comparison of a 30 m by 20 m grid electrode with vertical and horizontal rod electrodes revealed that the grid electrode achieves lower resistance values and uses less material.
[12]	The study highlighted that vertical grounding rods connected to a grid are vital for efficiently dissipating fault currents in optimized configurations.
[19]	In a two-layer soil model, vertical rods were found to reduce resistance and current through each conductor, enhancing grid performance.
[23]	Simulation results for grounding grids in uniform soils closely matched experimental measurements, leading to a proposed equation for calculating soil resistance with minimal discrepancies.
[24]	The analysis stressed the significance of Ground Potential Rise (GPR) in high-resistivity soils and recommended using longer rods and reduced grid spacing to decrease resistance, despite potential costs.
[26]	Various grid configurations showed that the rectangular grid yielded the lowest resistance (0.339 Ω using IEEE and 0.193 Ω using FEM) while being the most cost-effective.
[27]	Among different grounding grid design methods, the Hybrid DE-SCA (HDESCA) technique provided the lowest resistance (0.073 Ω) and reduced design costs by 6.3%.
[28]	The combination of vertical rods and a grid was found to create a low-impedance path and ensure effective ground potential distribution, especially during high-magnitude fault or lightning events.

Figure 1 illustrates a comparison graph showing the average resistance values for four types of electrodes: rod, grid, plate, and grid with rods. This comparison allows for a clear understanding of how each configuration performs in terms of electrical resistance, providing valuable insight into their relative effectiveness.

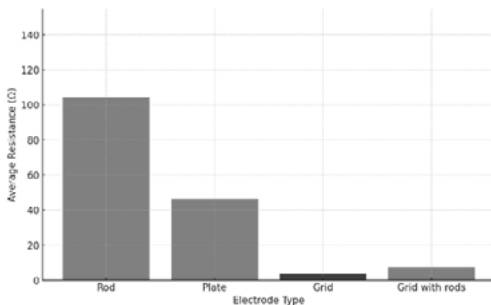


Figure 1. Comparative average resistance by electrode type.

Figure 2 presents a comparison chart showing the average resistance values for different electrode materials: copper, stainless steel, and galvanized steel. This comparison highlights the differences in conductivity and overall effectiveness of these materials when used in grounding systems.

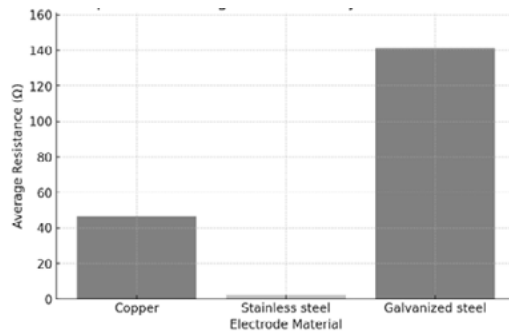


Figure 2. Comparative average resistance by electrode material.

4. Discussion

The discussion will focus on the evaluation of grounding resistance, installation and electrode performance under different soil conditions.

Both grid and rod configurations show a strong dependence on soil resistivity, with grids generally offering lower resistance compared to rods at similar soil resistivity levels Figure 1. This suggests that grid configurations may be more effective in reducing resistance in grounding systems Table 4, particularly in soils with moderate to high resistivity.

For rod electrodes, resistance tends to decrease as length increases Table 2, which is consistent with the understanding that longer rods provide better soil contact, thereby reducing resistance. Rod diameter also influences resistance, although this effect is less significant than that of length. However, in high resistivity soils, rod resistance increases significantly, potentially limiting their effectiveness. In extremely high resistivity soils, the resistance of rods can become prohibitively high, suggesting that alternative solutions or soil conditioning may be necessary. Larger grids, on the other hand, maintain relatively low resistance even in high resistivity soils, making them a more reliable option in various soil types.

While rods are simpler and cheaper to install, they exhibit significantly higher resistance than Table 2 grids, limiting their effectiveness in soils with high resistivity. Despite this, rods remain the easiest and quickest to install. However, grids, while requiring more labor and resources to install, offer lower grounding resistance, making them more suitable for applications handling high currents, such as electrical substations. From the research, it is observed that the electrode material plays a significant role in determining the average resistance values as demonstrated by Figure 2.

In the case of the research analysed, galvanized steel exhibits the highest resistance while stainless steel offers the lowest, making it a more efficient choice for grounding systems where minimizing resistance is crucial. This variation in resistance based on material underscores the importance of selecting appropriate electrode materials along with other factors such as soil resistivity and electrode configuration to achieve optimal grounding.

The incorporation of vertical rods in grounding grids has significantly improved fault current distribution and reduced system resistance in difficult soil conditions Table 5. Furthermore, studies indicate that the incorporation of vertical rods into grounding grids has significantly improved fault current distribution and reduced system resistance in difficult soil conditions.

The selection of electrode type and configuration should be based on a thorough evaluation of soil conditions and installation requirements. Combining different electrode types can enhance the efficiency and safety of grounding systems across various applications. While grid electrodes provide benefits in resistance and current distribution, rod electrodes may be more economical and easier to install, particularly when their length and diameter are optimized for specific soil conditions.

5. Conclusions

The conclusion of this article focuses on the key findings and practical implications derived from the comparative analysis of different types of ground electrodes used in electrical grounding systems. The comparison between rod and grid electrodes highlights a significant difference in resistance values obtained through experiments and simulations. While rod electrodes are simpler and more economical, they have notably

higher resistance, which limits their effectiveness in high-resistivity soils. Optimizing the length of rod electrodes is identified as a viable strategy to enhance grounding system efficiency in challenging soil conditions. Additionally, the analysis shows that rod electrodes are sensitive to soil resistivity, requiring increased length to reduce grounding resistance in high-resistivity soils, while grid electrodes perform better in such conditions due to their ability to distribute current more evenly. The study emphasizes the importance of selecting the right electrode type and configuration based on soil conditions and installation requirements.

Despite the progress made, the article also identifies areas that require further research. Specifically, the insufficient exploration of factors like electrode corrosion, aging, and the performance of grounding systems under extreme conditions, presenting opportunities for future studies. Additionally, there is a need for developing more accurate methods to predict electrode resistance in non-homogeneous soils and varying climatic conditions.

Acknowledgements

To the National Council of Science and Technology for the resources granted.

References

- [1] M. Kovacic and K. Cunningham, "Lighting Jobs: Easy Work or Easy Death," 2020 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW), Reno, NV, USA, 2020, pp. 1-8, doi: 10.1109/ESW42757.2020.9188331.
- [2] Aikaterini D. Baka, Athanasios D. Bakas, "Preventing electric shock accidents in workplaces", *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 13, Issue 6, 2022, 101702, ISSN 2090-4479, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101702>.
- [3] Obi, Patrick. *Electrocution, Accidents and Electrical Injuries in Nigerian Homes and Work Sites - Causes, Effects and Remedies*, 2020, doi: 15. 53-61. 10.9790/1676-1502025361.
- [4] IEEE, *Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std 80-2000, 2000.
- [5] IEEE, *Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, IEEE Std 141, 2007.
- [6] "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems," in *IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991)*, vol., no., pp.1-225, 30 Nov. 2007, doi: 10.1109/IEEESTD.2007.4396963.
- [7] X. Liu and T. Ge, "An Efficient Method for Calculating the Lightning Electromagnetic Field Over Perfectly Conducting Ground," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12, p. 4263, 2020. doi: 10.3390/app10124263.
- [8] Bo Zhang et al., "Numerical analysis of transient performance of grounding systems considering soil ionization by coupling moment method with circuit theory," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 5, pp. 1440-1443, May 2005, doi: 10.1109/TMAG.2005.844547.
- [9] Rodolfo A.R. Moura, Gabriel C.P. Silva, Elisa M.A. Oliveira, João A.C. Almeida, Fernando A. Assis, Marco Aurélio O. Schroeder, *Grounding grid effective area and impulsive impedance considering statistical-probabilistic characteristics of lightning currents*, *Electric Power Systems Research*, Volume 236, 2024, 110916, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110916>.
- [10] D. Jovanović, N. Cvetković, N. Raičević and Ž. Hederić, "Comparative analysis of plate and grid ground electrode characteristics as a part of grounding system," 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST), Osijek, Croatia, 2016, pp. 35-40, doi: 10.1109/SST.2016.7765628.
- [11] D. B. Jovanović, N. N. Cvetković, A. T. Ristic and V. B. Stanković, "Different calculation methods and experimental validation for various ground electrode types," 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2015, pp. 337-342, doi: 10.1109/ATEE.2015.7133827.
- [12] A. Qamar, I. Ul Haq, M. Alhaisoni, and N. N. Qadri, "Detecting Grounding Grid Orientation: Transient Electromagnetic Approach," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 24, p. 5270, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9245270>
- [13] El-Sayed M. El-Refaie, Said E. Elmasry, M.K. Abd Elrahman, Mohamed H. Abdo, *Achievement of the best design for unequally spaced grounding grids*, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 6, Issue 1, 2015, Pages 171-179, ISSN 2090-

- 4479,
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.09.013>.
- [14] D. Clark, S. Mousa, N. Harid, H. Griffiths and A. Haddad, "Lightning Current Performance of Conventional and Enhanced Rod Ground Electrodes," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 4, pp. 1179-1188, Aug. 2021, doi: 10.1109/TEM.2021.3059277.
- [15] O. Kherif, S. Chiheb, M. Tegar, A. Mekhaldi and N. Harid, "Investigation of Horizontal Ground Electrode's Effective Length Under Impulse Current," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 5, pp. 1515-1523, Oct. 2019, doi: 10.1109/TEM.2018.2864130.
- [16] S. Sekioka, T. Sonoda and A. Ametani, "Experimental study of current-dependent grounding resistance of rod electrode," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1569-1576, April 2005, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.838660>.
- [17] Muhammad U, Mohamad Nor N, Ramli AM, Ahmad NN. Effect of Ground Electrodes on the Susceptibility to Damage of Customer Premises Equipment (CPE) under Impulse Conditions. *Energies*. 2022; 15(3):1247. <https://doi.org/10.3390/en15031247>
- [18] J. Ladanyi, "Analyses of the Earthing Resistance of HV/MV Transformer Stations with Different Earth Electrode Arrangements and Soil Structures," 2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St. Petersburg, Russia, 2007, pp. 36-39, doi: 10.1109/EMCECO.2007.4371640.
- [19] O. E. Gouda, S. S. Dessouky, A. E. Kalas, and M. A. Hamdy, "Current Distribution in Grounding Grid Conductors with and without Vertical Rods Buried in Two-Layer Soil Model," *IEEE Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 13, pp. 1276-1284, 2018. <https://doi.org/10.1002/tee.22693>
- [20] Fürnschub, M., Pack, S., Schmutz, E. et al. Investigations of electrical interference of vertical earth rod arrangements. *Elektrotech. Inftech.* 140, 132-140 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00502-023-01121-9>
- [21] J. Nahman and I. Paunovic, "Resistance to Earth of Earthing Grids Buried in Multi-Layer Soil," *Electr. Eng.*, vol. 88, pp. 281-287, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00202-004-0282-y>
- [22] Sobhy Serry Dessouky, S. Ghoneim and S. Awad, "Grounding resistance, step and touch voltages for a driven vertical rod into two layer model soil," 2010 International Conference on Power System Technology, Zhejiang, China, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666612.
- [23] J. A. Guemes-Alonso, F. E. Hernando-Fernandez, F. Rodriguez-Bona and J. M. Ruiz-Moll, "A practical approach for determining the ground resistance of grounding grids," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1261-1266, July 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2006.874121.
- [24] A. Ackerman, P. K. Sen and C. Oertli, "Designing Safe and Reliable Grounding in AC Substations With Poor Soil Resistivity: An Interpretation of IEEE Std. 80," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1883-1889, July-Aug. 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2256092.
- [25] W. Pan, H. Sun, S. Chai and J. Zhou, "Research of optimal distance of external grounding grid," 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Wollongong, NSW, Australia, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/POWERCON.2016.7753964.
- [26] Sengar, K.P. and Chandrasekaran, K, "Effects of cost optimised grid configuration on earthing system performance: a comparative assessment", 2020. *IET Sci. Meas. Technol.*, 14: 610-620. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0192>
- [27] K. P. Sengar and K. Chandrasekaran, "Designing of Cost Minimum Substation Grounding Grid System Using DE, SCA, and HDESCA Techniques," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 13, pp. 1260-1267, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0021>
- [28] Sengar, K.P., Chandrasekaran, K. Analysis of grounding system transient with consideration of soil ionization and mutual coupling effect. *Journal of Electrical Systems and Inf Technol* 10, 53 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00120-2>
- [29] T.R. Ayodele, A.S.O. Ogunjuyigbe, O.E. Oyewole, Comparative assessment of the effect of earthing grid configurations on the earthing system using IEEE and Finite Element Methods, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 21, Issue 5, 2018, Pages 970-983, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.07.003>.
- [30] FAUDZI, A. H. M., et al. A study on copper and galvanized grounding performance using palm oil fuel ash as new additive material. *En Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. p. 012037.

Revisión literaria sobre la gentrificación comercial de los mercados tradicionales en ciudades turísticas

Literature Review of the Commercial Gentrification of Traditional Markets in Touristic Cities

Murillo Cuevas, Damarix Sarai*

Flores Gutiérrez, Avatar* Navarrete Escobedo, David**

**Doctorado en Innovación, Tecnología y Hábitat, Facultad de Ingeniería*

Universidad Autónoma de Querétaro

***Departamento de Arquitectura de la*

Universidad de Guanajuato

dmurillo21@alumnos.uaq.mx

Palabras clave: ARQ, gentrificación comercial, mercado tradicional, ciudad turística, alimentación.

Resumen- El propósito de esta revisión es conocer el estado del arte de la gentrificación comercial de los mercados públicos o tradicionales en ciudades turísticas, mediante el análisis literario sistemático de investigaciones recientes que, puedan servir a los lectores interesados en evaluar y aprovechar el trabajo realizado por otros investigadores.

Utilizando las herramientas de búsqueda avanzada desde la base de datos bibliográfica de Scopus y Web of Science (WOS), se identificó una muestra de trabajos de investigación publicados entre 2015 y 2023 que, abordan la gentrificación comercial de los mercados en contextos turísticos, cuya revisión sistemática, se basó en las directrices de la metodología PRISMA 2020, para obtener una síntesis y reflexionar sobre los resultados obtenidos.

El resultado de la revisión sistemática permitió identificar un total de 138 trabajos de investigación en ambas bases de datos, de los cuales se obtuvieron 3 estudios que cumplieron con los criterios de elegibilidad; es decir, trabajos que abordan la gentrificación comercial -derivada del turismo- de los mercados tradicionales. Detectando un vacío en el conocimiento al respecto de los impactos de la gentrificación comercial al interior de los mercados y los sectores de la población popular en ciudades turísticas.

Keywords: ARQ, commercial gentrification, traditional market, touristic city, food.

Abstract- The purpose of this review is to examine the state of the art of commercial gentrification in public or traditional markets in tourist cities, through a systematic literary analysis of recent research that can benefit readers interested in assessing and leveraging the work conducted by other researchers.

By employing advanced search tools from the bibliographic databases Scopus and Web of Science (WOS), a sample of research studies published between 2015 and 2023 was identified, focusing on commercial gentrification in markets within tourist contexts. The systematic review adhered to the PRISMA 2020 methodological guidelines, with the aim of synthesizing and critically reflecting on the findings.

The outcome of the systematic review identified a total of 138 research studies across both databases, of which 3 studies fulfilled the eligibility criteria; namely, studies that address the commercial gentrification -driven by tourism- of traditional markets. The review revealed a notable knowledge gap regarding the impacts of commercial gentrification within markets and its effects on the lower-income populations in tourist cities

1. Introducción

El término gentrificación fue abordado por primera vez por [Ruth Glass \[1\]](#), para describir el fenómeno social del desplazamiento de residentes de la clase trabajadora por una clase media próspera. La forma tradicional de dicho fenómeno implica la renovación de antiguas viviendas, cambios en la población residente e incrementos en los costes de alquiler. Es un proceso de cambio de un territorio que, implica cambios físicos, culturales, económicos y de entornos urbanos con el paso del tiempo [\[2\]](#), [\[3\]](#), [\[4\]](#).

Para [Neil Smith \[5\]](#), la gentrificación implica borrar la geografía y la historia de la clase trabajadora, una frontera donde los nuevos habitantes domesticarán el salvaje espacio marginal [\[6\]](#); y ocurre cuando el capital busca escenarios de inversión alternativos con altas tasas de ganancia y bajo riesgo.

La gentrificación comercial como fenómeno social reconocido desde principios del siglo XXI por [Zukin \[9\]](#) en Harlem; señala que la cultura y la identidad sirven como canal para la acumulación de capital, lo que llama “economía simbólica” [\[10\]](#); dichos estudios exploran el impacto del desplazamiento de pequeños comercios, la demografía y los cambios del vecindario, para comercializar y promover los espacios urbanos [\[11\]](#).

Por otra parte, la gentrificación comercial minorista [\[12\]](#), se refiere a la transformación de los espacios comerciales en determinados barrios debido a la afluencia de residentes e inversores con mayor poder adquisitivo. Este proceso a menudo conduce al desplazamiento de residentes de larga data, particularmente aquellos grupos de menores ingresos o poblaciones étnicas minoritarias.

[Bourdieu \[13\]](#) discute la relación entre consumo, ideología y clase social. Ya que, el gusto y los estilos de vida están estrechamente vinculados a la clase social y al consumo de ciertos objetos para reforzar el estatus social. En relación con el espacio urbano, vivir en un buen vecindario se considera virtuoso, mientras que vivir en un barrio marginal supone un estigma [\[14\]](#).

En estos procesos destaca el papel de gobiernos e instituciones locales en la promoción y facilitación de la gentrificación a través de proyectos de reestructuración y rehabilitación urbana, lo que tiene implicaciones para la comunidad y su identidad [\[15\]](#).

Caso particular es la gentrificación comercial ligada a los mercados tradicionales en entornos turísticos que influyen directamente sobre la oferta y la demanda de productos alimenticios que representan no solo la parte identitaria de la región, sino también la nutricional y que implica serias repercusiones para la población de menores ingresos [\[16\]](#).

Desde la geohistoria, [David Navarrete \[2\]](#) expone que el turismo ligado a los mercados tradicionales, surgido desde el siglo XIX, incluían paradas obligadas a estos equipamientos para reforzar la idea de explorar lo exótico. Posteriormente, el Estado pone a los mercados a cubierto y los prioriza como equipamientos fundamentales en la planeación y la modernización de las ciudades. Sin embargo, con la entrada de las políticas neoliberales, estos equipamientos dejaron de ser prioritarios y se dio paso a la iniciativa privada a través de los supermercados.

Esta situación ha dejado a los mercados en la mira de los programas de modernización y rescate selectivo [\[17\]](#), priorizando aquellos localizados en ciudades turísticas estratégicas donde pueden fungir como un catalizador de la gentrificación.

2. Metodología

Para la revisión literaria sistemática de los trabajos de investigación, se utilizó como guía las directrices de la metodología PRISMA 2020, como se presenta a continuación.

Criterios de elegibilidad: Para la revisión literaria, se consideraron todos aquellos trabajos de investigación publicados entre 2015 y octubre de 2023 -fecha de corte de esta revisión- para reconocer el tema de la gentrificación comercial de los mercados en entornos turísticos durante los últimos 8 años; sin hacer distinción entre tipo de publicación científica, idioma u origen de la publicación.

Fuentes de información: Se utilizaron las bases de datos bibliográficas Scopus y WOS consultadas hasta el 25 de octubre de 2023.

Estrategia de búsqueda: Se realizaron búsquedas avanzadas en ambas fuentes de información, utilizando el criterio “Título del artículo, resumen, y palabras clave”, con los operadores booleanos siguientes.

Tabla 1	Criterios de búsqueda
Palabra y operador	
<i>Gentrification</i>	
<i>Gentrification AND Commercial</i>	
<i>Gentrification AND Commercial AND Market</i>	

Proceso de selección de los estudios: Se seleccionaron todos aquellos estudios publicados que, abordaran como tema principal en título, palabras clave y/o resumen, la gentrificación comercial de los mercados tradicionales. El proceso de inclusión y exclusión de los trabajos de investigación arrojados por las bases de datos mencionadas se realizó mediante la plataforma web colaborativa de revisión sistemática Rayyan.

Proceso de extracción de los datos: Los artículos seleccionados fueron analizados a profundidad, utilizando el programa Atlas.ti

para codificar los conceptos relevantes de la revisión.

Métodos de síntesis: Se identificaron los mercados como casos de estudio y se agruparon los conceptos referentes a los agentes gentrificadores, el discurso legitimador de las transformaciones selectivas y los indicadores de la gentrificación comercial y alimentaria.

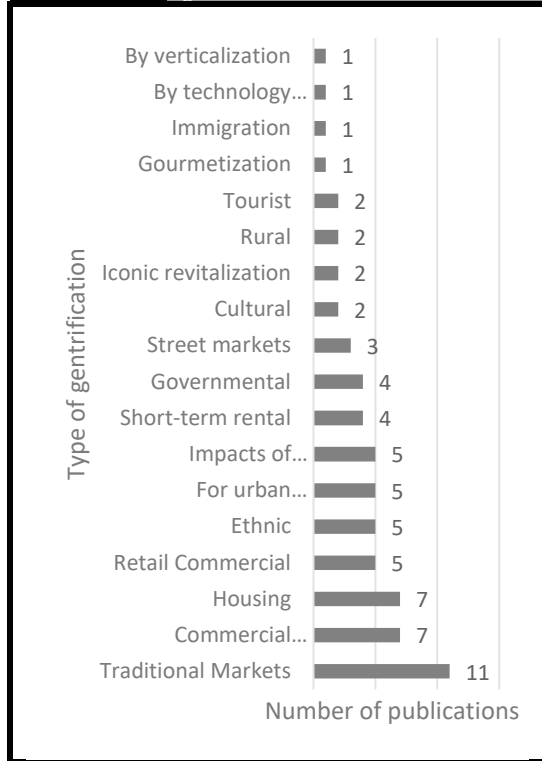
3. Resultados y discusión

Selección de los estudios: Se realizaron las búsquedas en las bases de datos, de acuerdo con los criterios establecidos en la metodología, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 2	Criterios de búsqueda	
Palabra y operador	Scopus	WOS
<i>Gentrification</i>	6,102	6,672
<i>Gentrification AND Commercial</i>	366	323
<i>Gentrification AND Commercial AND Market</i>	64	74

Se obtuvieron un total de 138 trabajos de investigación utilizando como criterio de búsqueda “Gentrification AND Commercial AND Market”, de los cuales 64 corresponde a la base de datos Scopus y 74 a WOS; combinando ambas bases de datos, se identificaron 42 investigaciones duplicadas y 28 trabajos publicados previos al 2015 los cuales, fueron excluidos por estar fuera de la temporalidad planteada; quedando 68 publicaciones elegibles, las cuales fueron revisadas en título, resumen y palabras clave, para identificar que se tratara como tema principal la gentrificación comercial, los mercados y las ciudades turísticas como temas principales; para ello, se realizó una categorización del tipo de gentrificación abordada, obteniendo los siguientes resultados:

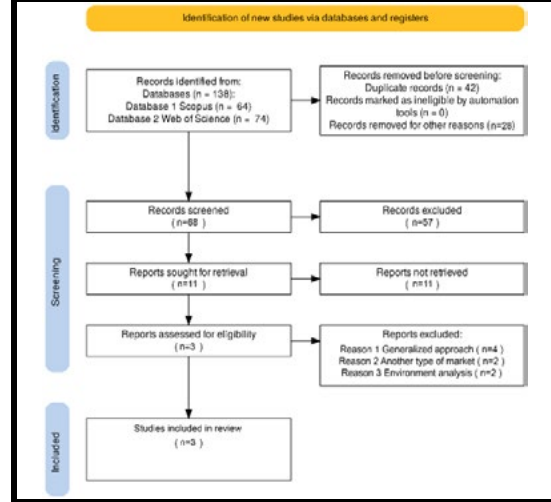
Figura 1 Classification of articles by type of gentrification



De acuerdo con la categorización, se encontró que 58 investigaciones abordan diferentes tipos de gentrificación y sólo 11 de ellos consideran el fenómeno en los mercados tradicionales como tema principal; por lo que, fueron excluidos 48 trabajos como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

Sin embargo, en la revisión profunda de estos 11, se descartaron 8 artículos más, porque en su fondo de contenido no cumplían con los criterios de elegibilidad, siendo las razones que se expresan a continuación.

Figura 2 Flow Diagram PRISMA 2020



Razón de exclusión 1: Derivado de la revisión profunda, se encontró que en algunos trabajos de investigación como los presentados por Guimarães [18], Salazar Martínez, et al. [19], González [20] y Pérez García, et al. [21] abordan la gentrificación de los mercados de manera generalizada, descriptiva y/o comparativa, sin casos de estudio específicos.

Razón de exclusión 2: Estudios que abordan otro tipo de mercados como los de comida callejera [22] y los de pulgas [23], que no forman parte del criterio. Cabe resaltar que esta es una futura línea de investigación.

Razón de exclusión 3: Se excluyó una investigación [24] que, aborda la gentrificación del comercio minorista circundante a un mercado en Lisboa.

Tabla 3 Lista de investigaciones excluidas en último cribado

Cita	Motivo
Razón de exclusión 1	
[18]	Estudio de análisis de la transferencia de modelos de rehabilitación de mercados de España a Portugal enfocados en la estética, sin un abordaje profundo en particular.
[19]	Estudio histórico-comparativo generalizado sobre 2 mercados europeos, 3 brasileños y 2 mexicanos que, no son públicos ni cuenta con información de fondo de cada mercado.
[20]	Estudio de análisis crítico de los mercados entorno a los procesos de gentrificación, disputa y practicas alternativas en un abordaje global.

[21]	Este estudio debate sobre el surgimiento de los mercados gourmetizados como el de La Boquería (Barcelona), el Mercado de San Miguel (Madrid) y el Borough Market (Londres) y como estos modelos son importados a México, sin considerar las particularidades de la región.
Razón de exclusión 2	
[22]	Estudio de los mercados de comida callejera en Londres, donde predomina el análisis de la atmósfera que promueve de forma sistémica la exclusión socioespacial.
[23]	Estudio sobre la integración progresiva de un mercado de pulgas del área urbana marginal periférica a París.
Razón de exclusión 3	
[25]	Analiza las transformaciones urbanas y sociales de los últimos 50 años del entorno de los mercados <i>9 de octubre</i> y <i>10 de agosto</i> , en Cuenca, Ecuador.
[24]	Estudio que se centra en los impactos de la gentrificación del comercio minorista en el entorno del mercado Campo de Oriuque en Lisboa, después de la rehabilitación de este mismo.

Características de los estudios: Una de las principales características de los trabajos seleccionados coincide en que, su objetivo principal se basa en el análisis de los impactos de las transformaciones de los mercados públicos y asumen posturas críticas al respecto de la gentrificación comercial. Los autores hacen uso de metodologías mixtas donde predominan técnicas de observación, entrevistas y encuestas.

La mayoría de los hallazgos muestran indicadores (exclusión socioespacial, gourmetización, estilización, encarecimiento de productos, desplazamiento, entre otros) que, evidencian el impacto negativo de las transformaciones de los mercados al abasto popular de poblaciones vulnerables o minoritarias.

Tabla 4 Características de las investigaciones incluidas		
Autor	Ciudad	Descripción
[26]	Belo Horizonte, Brasil	Estudio comparativo entre el mercado <i>Central</i> que, conserva los patrones tradicionales de propiedad individual y longevidad de las tiendas y el mercado <i>Novo</i> que, busca la “autenticidad calculada” y refuerza indiscriminadamente la perspectiva de consumo en el lugar.
[27]	Barcelona, España	Reconoce los impactos del turismo en el abasto local del mercado de la <i>Boquería</i> y propone atraer población local joven a partir de la utilización de redes sociales que enfatizan su imagen tradicional.
[28]	Madrid, España	Analiza los principales impactos de la transformación y gourmetización del mercado <i>San Antón</i> , así como la implantación del discurso del deterioro y el declive del mercado <i>Los Mostenses</i> para introducir un proyecto de transformación de capital privado para transformarlo en un espacio de esparcimiento.

Los casos de estudio seleccionados de De Castro Almeida, et al. [26], Gutiérrez Aragón, et al. [27] y Arreortúa Salinas [28], nos muestran como los agentes gentrificadores pueden ser internos, externos o gubernamentales, quienes utilizan el discurso del progreso económico y la revalorización centrada en la estilización, el ocio y el entretenimiento, y no así, en el abasto popular; permitiendo identificar una relación entre la gentrificación comercial y la gentrificación alimentaria derivada de una sustitución

selectiva de su clientela y justificada por una desinversión sistemática de su infraestructura; así como, una paulatina sustitución de los productos básicos.

Tabla 5 Síntesis de la revisión				
Caso de estudio	Agente gentrificador	Discurso legitimador	Indicador	
			Gentrificación comercial	Gentrificación alimentaria
Mercado Novo, Belo Horizonte, Brasil [26]	Red de empresarios privados bajo la iniciativa “Bello Mercado Novo”	Promover la recuperación y valorización del centro de la ciudad de Belo Horizonte y el estado de Minas Gerais	Implantación de nuevas tiendas	Gourmetización de los productos
			Patrón selectivo de clientes	Destradicionalización
			Segregación	
La Boquería, Barcelona, España [27]	Administración del mercado	Desarrollo del progreso económico y turístico	Pérdida de clientela local	Degustación y apertura de restaurantes
			Turismo de masas	
Mercado Los Montes, Madrid, España [28]	Consejería urbanística y grupo de inversionistas Triball	El deterioro como argumento para la reproducción del modelo de mercado destinado al entretenimiento	Falta de inversión en mantenimiento	Cambio obligatorio de productos

4. Reflexión

El análisis literario sistemático de investigaciones publicadas en Scopus y Web of Science, exponen un vacío en el conocimiento, derivado de la falta de publicaciones en tan importantes bases de datos bibliográficos. Si comparamos los más de seis mil resultados de la búsqueda “gentrification” en cada una de las bases de datos, contra los menos de 74 resultados del criterio “gentrification and commercial and market”, estos apenas representan un 1% del abordaje general del fenómeno.

La reflexión sobre los tres artículos aquí revisados ejemplifica la interacción teórica y los casos de estudio; comenzando por el discurso legitimador de la gentrificación comercial desde los casos de Brasil [26], donde la promoción de la recuperación tiende a incrementar la brecha de alquiler del mercado Novo que señala Neil Smith [8]. El desplazamiento comercial al interior de los mercados y sus entornos, propician modelos de exclusión social como se analiza en el mercado Central, el cual se presenta como la frontera de Neil Smith [6].

El discurso que se expone en el mercado de la Boquería [27] sostiene que, el desarrollo económico y turístico se basa en atraer a la clase social joven creativa que, representa el consumo, la ideología y la clase social deseada, expresada por Bourdieu [13], donde se busca privilegiar a los grupos sociales con mayor poder adquisitivo y tratar de borrar el estigma del consumo popular a través de la implementación de tecnologías de comercio digital que detonen la transformación selectiva que menciona Delgadillo [17], utilizando - contradictoriamente- una imagen tradicional.

Por otra parte, en el mercado Los Montes [29], se acusa el deterioro y el declive como estigma [14] a través de la reproducción de modelos de mercado de capital privado destinados al entretenimiento, cuya distinción propicia la gentrificación comercial con graves consecuencias para la población local como señala Delgadillo & Niglio [16] a través de la transformación selectiva, como el caso del mercado de San Antón en Madrid.

La identificación de los agentes gentrificadores para el impulso e implementación de nuevos modelos de mercado, deja entrever a los actores clave y sus

intereses económicos. En el caso de los mercados brasileños [26], se identifica a la red de empresarios privados bajo iniciativas de modernización; caso similar en los mercados madrileños [29], donde los inversionistas privados actúan en conjunto con la consejería urbanística. En el caso de la Boquería, la transformación se atribuye a la administración del mercado bajo intereses particulares.

En cualquiera de los casos, el papel de gobiernos e instituciones locales en la promoción y facilitación de la gentrificación a través de proyectos de transformación tiene implicaciones para la comunidad y su identidad [15].

La gentrificación comercial en contextos turísticos influye directamente sobre la oferta y la demanda de productos alimenticios que representan no solo la parte identitaria de la región [16], sino también la nutricional.

Los indicadores de esos impactos también requieren un análisis importante en cada caso. Salinas Arreortúa [29] observa una paulatina falta de mantenimiento en el mercado de Los Mostenses para propiciar su rescate, mientras que De Castro Almeida [26] observa en el mercado Novo la implementación de nuevas tiendas con nombres distintivos en idiomas extranjeros, un frecuente patrón selectivo de clientes y una paulatina permeabilidad de estos patrones hacia -el todavía popular- mercado Central. Por su parte, Gutiérrez Aragón, et al., [27] observa una inminente pérdida de clientela local y un incremento en el turismo de masas en la Boquería.

Estos indicadores también se expresan en gentrificación alimentaria como la destradicionalización de los mercados brasileños y una progresiva gourmetización de los productos ofertados [26], mientras que Salinas Arreortúa [29] identifica un modelo de cambio obligatorio de los productos ofertados en Los Mostenses. Además, el modelo de mercado de esparcimiento que promueve una

oferta culinaria estilizada a través de la degustación de platillos refinados [27].

De manera global, se observa como los inversores se vuelven el motor del desplazamiento a través de proyectos de autenticidad calculada [12], promovidos por el modelo neoliberal.

Derivado de la revisión, se plantea una futura línea de investigación al respecto de la gentrificación alimentaria de los mercados tradicionales e itinerantes.

Finalmente, se encuentra que la mayoría de los casos de estudio se centran en países como España, Brasil y Reino Unido, por lo que, hace falta un mayor abordaje de la situación de los mercados públicos en otras ciudades turísticas, para conocer como estos resisten o sucumben a la presión turística y, sobre todo, como la gentrificación alimentaria afecta a la población popular en su abasto cotidiano.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

Referencias

- [1] R. Glass, London: Aspects of Change, London: MacGibbon & Kee., 1964.
- [2] D. Navarrete Escobedo, «Mercados tradicionales, turismo y gentrificación en centros históricos patrimoniales: Aproximaciones teóricas desde una geohistoria.» de *Comercio Tradicional y Ciudades Contemporáneas*, U. d. Guanajuato, Ed., Guanajuato, Mandorla, 2019, pp. 13-36.
- [3] M. Hayes, «The coloniality of UNESCO's heritage urban landscapes: Heritage process and transnational gentrification in Cuenca, Ecuador,» *Urban Studies*, vol. 57, n° 15, pp. 3060-3077, 2020.
- [4] A. Hernández Cordero, «La gentrificación, un concepto trasatlántico: Diálogos entre España y México,» *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, pp. 13-45, 2022.
- [5] N. Smith, «Toward a Theory of Gentrification A Back to the City Movement by Capital, not People,» *Journal*

- [6] N. Smith, The new urban frontier : gentrification and the revanchist city, London: Routledge, 1996.
- [7] S. Zukin, V. Trujillo, P. Peter, D. Jackson, T. Recuber y A. Walker, «New Retail Capital and Neighborhood Change: Boutiques and Gentrification in New York City,» *City & Community*, vol. 8, n° 1, pp. 47-64, 2009.
- [8] S. Zukin, The Cultures of Cities, Massachusetts: Blackwell Publishers Inc, 1995.
- [9] S. Zukin, «Reconstructing the authenticity of place,» *Theory and Society*, vol. 40, n° 161, pp. 161-165, 2011.
- [10] W. Song, J. Sun, Y. Chen, S. Yin y P. Chen, «Commercial gentrification in the inner city of Nanjing, China [南京内城商业绅士化发育特征研究],» *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, vol. 75, n° 2, pp. 426 - 442, 2020.
- [11] P. Bourdieu, La Distinción. Criterios y bases sociales del gusto, Madrid: Taurus, 1979.
- [12] P. Bourdieu, Razones prácticas. Sobre la teoría de la acción, París: Anagrama, 1999.
- [13] S. González, Contested Markets, Contested Cities, London, UK: Routledge, 2017.
- [14] V. Delgadillo y O. Niglio, Mercados de Abasto. Patrimonio turismo gentrificación, Roma: Aracne Editrice, 2020.
- [15] V. Delgadillo, «Mercados del centro histórico de la Ciudad de México, entre el abandono y la modernización selectiva,» de *Comercio Tradicional y Ciudades Contemporáneas*, U. d. Guanajuato, Ed., Guanajuato, Mandorla, 2019, pp. 37-62.
- [16] P. P. Guimarães, «Reabilitação ou gentrificação comercial? Discurso e práticas associadas à transformação dos mercados municipais de comércio em Portugal,» *Revista de urbanismo*, n° 48, pp. 135-155, 2023.
- [17] B. L. Salazar Martínez, L. A. Vázquez Honorato, R. Ramo Díaz y M. D. Picanço Bentes, «Los centros de abasto popular en la ciudad neoliberal Las transformaciones de los mercados tradicionales, periodo 2013-2021,» *Anales de Investigación en Arquitectura*, vol. 12, n° 2, pp. 38-48, 2022.
- [18] S. González, «Contested marketplaces: Retail spaces at the global urban margins,» *Progress in Human Geography*, pp. 877-897, 2020.

- [19] E. Pérez García, E. Carmona Mateos, V. Maiello y A. Sebastián Rodríguez, «Gourmet markets as a commercial gentrification model: The cases of Mexico city and Madrid,» de *Contested Markets, Contested Cities: Gentrification and Urban Justice in Retail Spaces*, S. González, Ed., New York, Taylor and Francis, 2017, pp. 86-98.
- [20] P. Concha, «Atmósfera de lugar y exclusión en el caso de los mercados de comida callejera de Londres,» *Revista 180*, vol. 49, pp. 43-54, 2022.
- [21] M. Gravari Barbas y S. Jacquot, «Mechanisms, actors and impacts of the touristification of a tourism periphery: The Saint-Ouen flea market, Paris,» *International Journal of Tourism Cities*, vol. 5, n° 3, pp. 370-391, 2019.
- [22] P. P. Guimarães, «Exploring the Impacts of Gentrified Traditional Retail Markets in Lisbon in Local Neighbourhoods,» *Social Sciences*, vol. 8, n° 6, pp. 1-14, 2019.
- [23] A. Orellana Briones, J. Olalla Heras y V. Barros Heras, «Transformaciones sociales y urbanas del entorno de los Mercados del Centro Histórico de Cuenca. Mercado 9 de Octubre y Mercado 10 de Agosto,» *Urbano*, vol. 24, n° 44, pp. 20-33, 2021.
- [24] R. De Castro Almeida, Á. M. Marçal y S. T. Guimarães, «Mercados Públicos na área central de Belo Horizonte: transformações, resistências, tensão,» *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, vol. 14, pp. 1-14, 2022.
- [25] Ó. Gutiérrez Aragón, E. Alcaraz Espriu y M. Solano Tatché, «Efectos de la masificación y de los cambios en el consumo sobre los mercados locales. El caso de La Boquería de Barcelona,» *Pasos*, vol. 20, n° 1, pp. 153-167, 2022.
- [26] L. Salinas Arreortúa, «Transformation of municipal markets in Madrid. From a consumption environment to a leisure environment,» *Revista INVI*, vol. 31, n° 86, pp. 179-201, 2016.
- [27] N. Smith, «New Globalism, New Urbanism: Gentrification as Global Urban Strategy,» *Antipode*, vol. 34, n° 3, pp. 427-450, 2002.
- [28] L. A. Salinas Arreortúa, «Transformación de mercados municipales de Madrid. De espacio de consumo a espacio de esparcimiento,» *Revista INVI*, vol. 31, n° 86, pp. 179-201, 2016.
- [29] N. Smith, Gentrification and the Rent Gap. Annals of the Association of American Geographers, 1987.

Detección automática de cortocircuito entre espiras en transformador seco mediante flujo magnético de dispersión y análisis de indicadores estadísticos

Automatic Detection Turn-To-Turn fault in Dry Transformers Using Magnetic Leakage Flux and Statistical Indicators Analysis

Cruz Ramírez, D., Zamudio Ramírez, I., Osornio Ríos, R.A., Daviu, J.A

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Cruzramirezdaniel93@gmail.com

Palabras clave: MEC, transformador eléctrico, flujo magnético de dispersión, indicadores estadísticos, análisis de componentes principales, redes neuronales artificiales.

Resumen- Los transformadores eléctricos son máquinas eléctricas estáticas encargadas de convertir el nivel de tensión del lado primario a otro nivel en el lado secundario. Su uso es fundamental en la vida cotidiana, ya que permiten transmitir y distribuir energía a sectores industriales, residenciales y comerciales. Los cuales son sometidos a diferentes condiciones de operación, factores ambientales y mantenimiento. Su principio de operación se basa en la inducción electromagnética, lo que conlleva pérdidas, siendo una de ellas el flujo magnético de dispersión, el cual rodea los devanados y el núcleo ferromagnético. Este flujo puede verse afectado en su componente axial ante un cortocircuito entre espiras. En este trabajo se presenta una metodología para el análisis del flujo magnético de dispersión en las componentes axial, radial y combinada. Para ello, se utilizó un sensor magnético triaxial no invasivo para capturar las señales en estado estable y bajo condiciones de falla. Estas señales fueron adquiridas por una tarjeta de adquisición basada en un FPGA (del inglés Field Programmable Gate Array), y procesadas mediante la implementación del algoritmo de extracción de características PCA (del inglés Principal Component Analysis). Finalmente, se implementó la etapa de clasificación basada en una red neuronal artificial.

Keywords: MEC, electrical transformer, magnetic leakage flux, statistical indicators, Principal Component Analysis, artificial neural network.

Abstract- Electric transformers are static electrical machines responsible for converting the voltage level from the primary side to another level on the secondary side. Their use is fundamental in daily life, as they enable the transmission and distribution of energy to industrial, residential, and commercial sectors, which are subjected to various operating conditions, environmental factors, and maintenance requirements. Their operating principle is based on electromagnetic induction, which leads to losses, one of which is the magnetic leakage flux that surrounds the windings and the ferromagnetic core. This flux is affected in its axial component by short circuits between turns. Therefore, this study presents a methodology for analyzing the magnetic leakage flux in the axial, radial, and combined components. A non-invasive triaxial magnetic sensor was used to capture the signals in both steady-state and failure conditions. These signals were acquired by a data acquisition card based on an FPGA (Field Programmable Gate Array) and processed through the implementation of the PCA (Principal Component Analysis) feature extraction algorithm. Finally, a classification stage was implemented based on an artificial neural network.

1. Introducción

Los transformadores eléctricos son esenciales para la distribución y suministro de energía eléctrica, destacándose por su robustez, rentabilidad y eficiencia [1]. Los transformadores secos son utilizados ampliamente en data centers, para ajustar niveles de tensión en equipos creados bajo diferentes estándares eléctricos, suministro residencial y comercial. Sin embargo, están sujetos a diversas condiciones que pueden causar fallas, tales como deformaciones en el núcleo, deterioro del aislamiento, barras de conexión rotas y cortocircuitos entre espiras, etc. Las encuestas globales indican que las fallas en los devanados representan el 37% de los problemas [2], generando riesgos para el personal, pérdidas económicas y falta de suministro en sectores residencial y comercial, debido al tiempo de restablecimiento del servicio. Se han implementado diversas metodologías para detectar y diagnosticar fallos en transformadores eléctricos.

El estándar IEEE-STD-C57 152 describe pruebas de diagnóstico y medición en transformadores y reguladores de potencia llenos de líquido, como análisis de corriente y voltaje [3] - [4], análisis de gases disueltos [5], termografía infrarroja [6], y respuesta a la frecuencia [7]. Sin embargo, estas pruebas pueden no detectar fallos tempranos como cortocircuitos entre espiras y daños en el aislamiento. Otras metodologías nuevas han surgido como lo es análisis de vibraciones. Por su parte en [8] demostraron obtener buenos resultados para la detección de cortocircuito entre espiras o daños de aislamiento, pero estas señales son muy susceptibles al ruido generado por elementos externos e internos generados por señales inducidas. Al respecto, se han implementado metodologías basadas en el análisis del flujo magnético. Así, por ejemplo [9] - [10] demostraron que, ante un cortocircuito entre espiras, el flujo magnético pierde la simetría en el eje horizontal a la altura media del núcleo de los devanados, al colocar sensores tipo bobina en el interior de los devanados primario y secundario. Por otro

lado, [11] midieron el flujo magnético de dispersión de un transformador utilizando un sensor de efecto Hall, lo que permitió comprobar que es posible detectar cortocircuitos entre espiras a través de este flujo. Por su parte, [12] comprobaron que el flujo magnético de dispersión axial y radial pierden la simetría al presentarse una falla de cortocircuito entre espiras, mediante simulación y un sensor óptico de flujo magnético. Estos trabajos tienen la desventaja de ser invasivos, requerir conocimiento especializado para análisis de datos, y es necesario instalar los sensores al interior del transformador.

En este trabajo, se propone una metodología basada en el análisis de flujo magnético de dispersión, utilizando un sensor de efecto Hall triaxial no invasivo, y mediante técnicas de análisis de datos estadísticos y el uso de redes neuronales artificiales clasificar y detectar el fallo de cortocircuito entre espiras en un transformador seco trifásico.

2. Metodología

A. Flujo magnético de dispersión en transformadores.

En los transformadores eléctricos, no todo el flujo magnético del devanado primario pasa al secundario; parte de él se pierde a través del aire, lo que se conoce como flujo magnético de dispersión [9]. Este flujo, que no establece un vínculo entre los devanados, depende de la relación entre la reluctancia del circuito magnético. Las líneas de flujo de fuga están curvadas en los extremos de las bobinas y fluyen casi paralelas al eje del devanado. La curvatura de estas líneas se ve afectada por la distancia entre los devanados y el armazón de la máquina, así como por el tipo de devanado utilizado en su construcción [13].

Se ha demostrado que hay flujo magnético de dispersión que cruza verticalmente entre los devanados y el núcleo. Esta componente de flujo magnético de dispersión axial representada en la Fig. 1, es la que presenta mayor distorsión durante un cortocircuito, generando fuerzas que actúan desde el centro hacia los bordes de los devanados [9]. Estas

fuerzas pueden alcanzar niveles peligrosos, provocando cortocircuitos entre fases o fallas a tierra, y deformando el devanado exterior de alto voltaje.

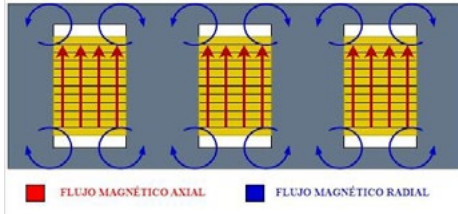


Figura 1. Flujo magnético de dispersión axial y radial en un transformador.

Las líneas de flujo magnético de dispersión radial se forman en el borde paralelas al eje de los devanados representadas en la Fig. 1. Estas generan fuerzas extendiendo los devanados externos de alta tensión, y comprimiendo los devanados internos de baja tensión ocasionando incremento de temperatura y vibraciones, dando paso a incrementar las componentes de flujo de dispersión.

Por último, las componentes rotacionales son ocasionadas por las corrientes de Foucault inducidas en el núcleo del transformador, las cuales tienen patrones circulares o rotacionales. En menor medida que un motor eléctrico en el cuál este efecto es más visible debido a que las excentricidades y desalineamiento amplifican estas componentes, en un transformador eléctrico al existir un cortocircuito entre espiras, corrientes armónicas, sobrecarga, etc., incrementan estas corrientes parasitas asociadas al núcleo ocasionando pérdidas por calor y vibraciones [11].

A. Indicadores estadísticos

Las señales captadas por el sensor magnético son registradas en el dominio del tiempo por un sistema de adquisición de datos. Para ello, el uso de indicadores estadísticos enunciados en las Ecs. (1-9) referidos en la Tabla 1, permiten extraer información sobre el comportamiento de las señales. Esta información es importante para evaluar los cambios en el equipo en estado sano y con fallas, ayudando a identificar patrones de

fallas. Sin embargo, un conjunto reducido de características puede no describir adecuadamente el funcionamiento del sistema, y muchas características pueden ser redundantes sin aportar información relevante sobre fallos. Además, trabajar con un gran número de características implica un alto costo computacional [8].

B. Reducción de características

La reducción de características consta de dos etapas: selección y extracción de características, basadas en algoritmos que permitan descubrir información relevante, evitar redundancia, y reducir el número de datos.

Tabla 1. Indicadores estadísticos.

Indicador	Ecuación matemática	No.
Media aritmética	$F1 = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i$	1)
Raíz media cuadrática (RMS)	$F2 = (\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i^2)^{1/2}$	2)
Media aritmética (SRM)	$F3 = (\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i ^{1/2})^2$	3)
Desviación estándar (σ)	$F4 = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (X_i - T_i)^2}$	4)
Varianza	$F5 = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (X_i - F1)^2$	5)
Mínimo	$F6 = \min(X)$	6)
Kurtosis	$F7 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - F1)^4}{F4^4}$	7)
Skewness	$F8 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - F1)^3}{F4^3}$	8)
Entropía de Shanon	$F9 = \sum_{i=1}^N X_i^2 \log(X_i^2)$	9)

a) Selección de características

A partir de un conjunto de características, esta etapa permite maximizar la relevancia de la información y evitar redundancia, convirtiéndolo en un subconjunto con menor número de ellas. El análisis ANOVA es una técnica estadística que compara las medidas de dos o más grupos de datos, con la finalidad de detectar si al menos uno de ellos es significativamente diferente a los demás. La forma más sencilla de interpretar los datos es a

través del p-valor (p), si este es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que hay una diferencia significativa en al menos dos grupos de datos. Además, el factor F , si tiene un valor alto, sugiere que existe una mayor variabilidad entre los grupos de datos en comparación con la variabilidad dentro de cada grupo.

b) Extracción de características

Es el proceso de transformar un conjunto de características en un subconjunto reducido, construido por el conjunto original.

El análisis de componentes principales (PCA), es una técnica no supervisada, basada en un algoritmo de transformación lineal que produce nuevas características, llamadas componentes principales (PCs). Esta técnica determina la máxima varianza de los datos, proyectando una dimensión de datos a un nuevo subespacio donde los ejes o PCs son considerados como las direcciones de la varianza máxima de datos.

El algoritmo para implementar PCA se detalla con los siguientes pasos:

1. Estimar la matriz de covarianza (S) de todo el conjunto de datos (X).
2. Realizar la descomposición de eigen valores y eigen vectores de " S ".
3. Ordenar de manera descendente los eigen valores y eigen vectores.
4. Elegir la dimensión menor a la original " m ".
5. Utilizar los " m " eigen vectores para construir la matriz de transformación (W).
6. Transformar cada vector " X " de la " d " dimensión original a la nueva dimensión " m " con la transformación $Y = W^T X$ [14].

C. Redes neuronales artificiales.

Una red neuronal artificial es un conjunto de unidades de procesamiento denominadas neuronas, interconectadas entre capas por conexiones con pesos sinápticos. Una de las arquitecturas más comunes son las redes

neuronales feed-forward detallada en la Fig. 2, compuesta por la siguiente estructura:

Capa de entrada: se denota por entradas de datos " i ", no hay procesamiento de datos.

Capa oculta: se compone de neuronas " j ", son unidades de procesamiento con capacidad limitada de memoria y realiza cálculos locales, dentro de esta capa se tiene la función de excitación " S_j^p " denotada por la Ec. (10), y la función de transferencia " h_j^p " donde se cuenta con un grupo variado entre las más comunes se muestran en la Tabla 2.

$$S_j^p = \sum_{i=1}^n W_{i,j}^p X_i^p + W_{n+1,j}^p \quad (10)$$

Tabla 2. Funciones de activación.

Nombre	Función	No.
Función lineal	$h_j^p = S_j^p$	11)
Función escalón unitario	$h_j^p = \begin{cases} 0, & S_j^p < 0 \\ 1, & S_j^p \geq 0 \end{cases}$	12)
Función sigmoide	$h_j^p = \frac{1}{1 + e^{-S_j^p}}$	13)
Función hiperbólica	$h_j^p = \frac{e^{S_j^p} - e^{-S_j^p}}{e^{S_j^p} + e^{-S_j^p}}$	14)

Donde " n " representa el número de entradas a la red neuronal más el sesgo o bias cuya función es evitar que el algoritmo se indetermine, " p " es la posición de la iteración, " $W_{i,j}^p$ " representa los pesos sinápticos y se determinan con la Ec. (15), " X_i^p " datos de entrada.

$$W_{i,j}^p = W_{i,j}^{p-1} + \eta \zeta_j^p X_i^p \quad (15)$$

Siendo " η " el coeficiente de aprendizaje con valores de entre " $0 \leq \eta \leq 1$ ", " ζ " toma el valor del error en este caso en particular para utilizar el algoritmo de retro propagación.

Capa de salida: se denota por neuronas " k ", son unidades de procesamiento.

A. Esquema metodológico

La Fig. 3 muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta, que se encuentra basada en un banco de pruebas con un transformador seco trifásico operando en

estado estable, y en cortocircuito entre espiras. El flujo magnético de dispersión es medido por un sensor de efecto Hall triaxial, y las señales serán almacenadas en una tarjeta de adquisición de señales.

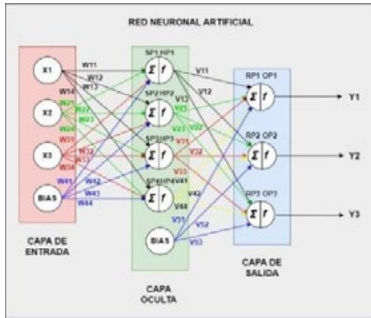


Figura 2. Arquitectura de una red neuronal Feed-Forward.

Posteriormente en la etapa de procesamiento de datos en el dominio del tiempo, se aplican las características estadísticas mostradas en la Tabla 1 a las señales adquiridas. En la etapa de selección de características, se utiliza la técnica ANOVA para discriminar los estadísticos que no aportan información relevante para la separación entre los grupos de estado sano y falla. Para la etapa de extracción de características, se aplica PCA, un algoritmo que permite separar automáticamente los grupos de datos, generando un subespacio con menor número de datos. Finalmente, la etapa de clasificación, basada en una red neuronal Feed-Forward, determinará el estado del transformador trifásico, indicando si se encuentra en estado sano o en falla.

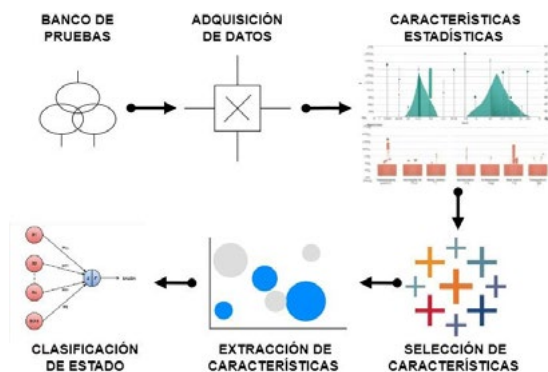


Figura 3. Metodología del proyecto.

3. Resultados y discusión

El banco de pruebas utilizado para medir el flujo magnético de dispersión en el devanado 1, tanto en estado estable como en cortocircuito se realizó de acuerdo con la Fig. 4, está constituido por un transformador trifásico marca SQUARE D, 15 kVA, 440 V – 220/127 V, con un %IZ de 4.7. Durante un minuto, se tomaron quince muestras de cada estado, siguiendo el esquema de la Fig. 5. Para la medición se empleó un sensor de efecto Hall triaxial modelo BM1422AGMV con sensibilidad de 0.04 $\mu\text{T/LSB}$, colocado perpendicular al devanado, y conectado a una tarjeta de adquisición de datos basada en un FPGA Spartan 6 XC6SLX45, a una frecuencia de muestreo de 1 kHz. Se colocó una resistencia de 1 Ohm y 300 Watts para reducir la corriente y disipar la energía generada por el cortocircuito en los TAPs 1 y 2 del devanado 1 del lado primario, equivalente a seis espiras en cortocircuito, y controlada por un interruptor termomagnético para proteger el equipo. El procesamiento de las señales adquiridas se realizó en MATLAB, cuyos resultados se detallan a continuación según la metodología propuesta.

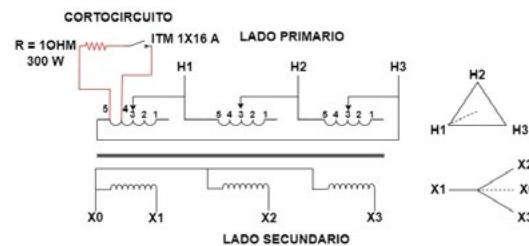


Figura 4. Diagrama esquemático de cortocircuito entre espiras.

El procesamiento de datos se llevó a cabo, mediante la aplicación de los indicadores estadísticos mostrados en la Tabla 1, a las señales obtenidas de flujo magnético de dispersión axial, radial, y combinado, pasando por un proceso de normalización, se tomaron los valores máximos y mínimos, para dejar las señales en un rango amplitud de [1,-1]. Se seleccionaron los tres indicadores que aportan un mayor número de características de las señales en estado sano y falla, mediante un

análisis ANOVA, considerando el p-valor y la dispersión entregada por el factor F .

La etapa de reducción de características se realizó aplicando el algoritmo PCA, para la separación automática de las señales en cada componente de flujo magnético de dispersión, respecto a los estados en estudio. Finalmente, se utilizó una red neuronal Feed-Forward con 2 capas ocultas, y 2 neuronas por capa, con una función de activación sigmoide Ec. (13) referida en la Tabla 2, durante 100 épocas.

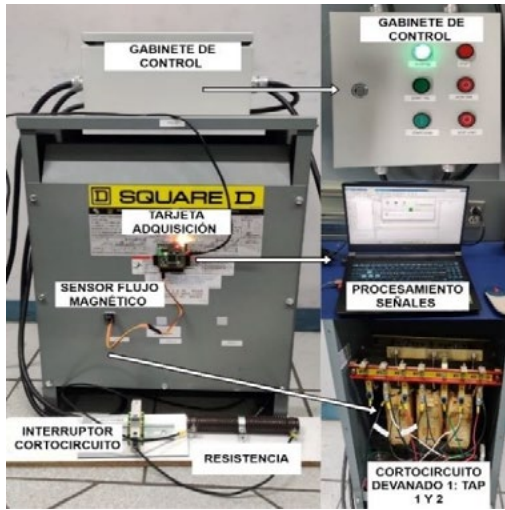


Figura 5. Banco de pruebas experimentales.

A. Flujo magnético de dispersión axial

El procesamiento de los datos obtenidos de flujo magnético de dispersión en el eje axial "X". Se realizó de acuerdo con la Fig. 6, se seleccionaron los indicadores estadísticos media aritmética, desviación estándar, y Kurtosis, conforme a los valores de los factores p-valor y F , con mayor rango de separación entre clases o grupos.

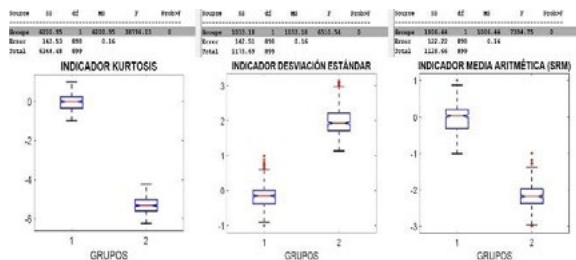


Figura 6. Resultado ANOVA indicadores estadísticos de flujo magnético de dispersión axial.

La Fig. 7, detalla el gráfico de dispersión al aplicar PCA a los indicadores estadísticos seleccionados, mostrando una gran separación entre clases. Como con siguiente, al aplicar el algoritmo de clasificación se obtiene una precisión y exactitud del 100%, ver Fig. 8.

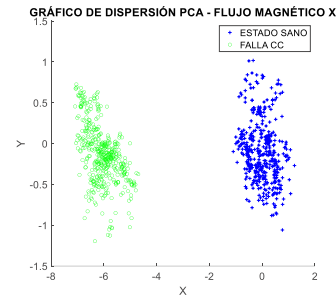


Figura 7. Gráfico de dispersión PCA en dos dimensiones, flujo magnético axial.

MATRIZ DE CONFUSIÓN			OBJETIVOS: 1) ESTADO SANO 2) ESTADO FALLA
CLASE DE SALIDA	CLASE OBJETIVO		
1	1	450 50.0%	0 0.0%
1	2	0 0.0%	450 50.0%
2	1	100% 0.0%	100% 0.0%
2	2	100% 0.0%	100% 0.0%

Figura 8. Matriz de confusión FFNN, flujo magnético de dispersión axial.

B. Flujo magnético de dispersión radial

Los indicadores estadísticos seleccionados, más representativos de acuerdo con el análisis ANOVA para el flujo magnético de dispersión radial, fueron la media, la raíz cuadrada de la media cuadrática y la entropía de Shannon, como se muestra en la Fig. 9. Durante la etapa de extracción de características, al aplicar el algoritmo PCA presentado en la Fig. 10, se observan conjuntos de datos superpuestos, siendo el estado sano el que presenta una mayor desviación estándar entre las clases.

El algoritmo de clasificación FFNN, para flujo magnético de dispersión radial muestra un 96.7 % de precisión, ver Fig. 11.

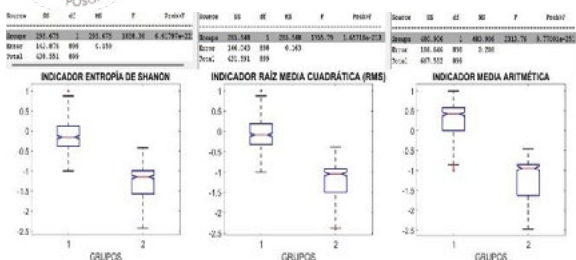


Figura 9. Resultado ANOVA indicadores estadísticos de flujo magnético de dispersión radial.

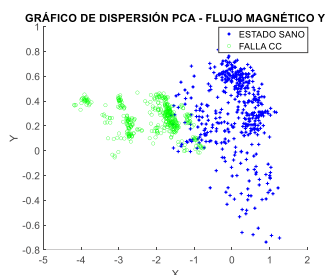


Figura 10. Gráfico de dispersión PCA en dos dimensiones, flujo magnético radial.

MATRIZ DE CONFUSIÓN			CLASES: 1) ESTADO SANO 2) ESTADO FALLA
CLASE DE SALIDA	CLASE OBJETIVO		
1	1	420 46.7%	0 0.0%
1	2	30 3.3%	450 50.0%
2	1	93.3% 6.7%	100% 0.0%
2	2	96.7% 3.3%	

Figura 11. Matriz de confusión FFNN, flujo magnético de dispersión radial.

C. Flujo magnético de dispersión combinado

De acuerdo con los indicadores estadísticos aplicados a las señales en estado sano y en falla, se seleccionaron la media, la raíz cuadrada de la media cuadrática y la entropía de Shannon para la componente de flujo magnético de dispersión combinada, ya que contienen las características más relevantes de las clases, como se muestra en la Fig. 12. Al aplicar el algoritmo PCA para separar las clases y transformarlas en un subespacio de dos dimensiones, se observa una intersección entre ambas clases de datos, donde el flujo magnético de dispersión en estado sano muestra una alta variación entre los datos, ver Fig. 13.

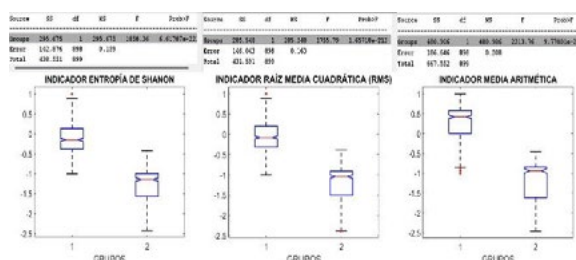


Figura 12. Resultado ANOVA indicadores estadísticos de flujo magnético de dispersión combinado.

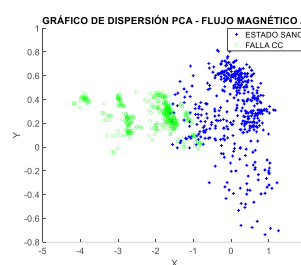


Figura 13. Gráfico de dispersión PCA en dos dimensiones, flujo magnético combinado.

El resultado al aplicar FFNN, para la clasificación del estado de falla muestra una precisión del 96.2%, de acuerdo con las métricas de desempeño mostradas en la Fig. 14, esto demuestra que existe un cambio significativo en las señales en estado sano y falla de cortocircuito entre espiras, en la señal de la componente de flujo magnético de dispersión combinado.

MATRIZ DE CONFUSIÓN			CLASES: 1) ESTADO SANO 2) ESTADO FALLA
CLASE DE SALIDA	CLASE OBJETIVO		
1	1	416 46.2%	0 0.0%
1	2	34 3.8%	450 50.0%
2	1	92.4% 7.6%	100% 0.0%
2	2	96.2% 3.8%	

Figura 14. Matriz de confusión FFNN, flujo magnético de dispersión combinado.

4. Conclusiones

Es posible detectar fallos de cortocircuito entre espiras, mediante el análisis de flujo magnético de dispersión en las componentes axial, radial, y combinado, utilizando un sensor no invasivo. Sin embargo, de acuerdo con la literatura y los resultados obtenidos el

eje axial muestra una mayor respuesta al separar mejor las clases de estado sano y falla, con una precisión y exactitud del 100% de acuerdo con las métricas de desempeño, el método comprueba que se puede predecir el fallo de forma automática, y sin necesidad de que el técnico tenga un amplio conocimiento en análisis de datos de flujo magnético. Las señales obtenidas en estado estable del sensor comparadas con las señales en estado de falla muestran un cambio significativo en amplitud, y en algunas componentes se generan distorsión en la forma de onda, lo cual se comprueba con mediante las gráficas de dispersión. Como prospectiva del trabajo, se plantea realizar análisis de flujo magnético de dispersión con más estados de falla, análisis de estado transitorio y estable, y análisis y descomposición de señales tiempo-frecuencia.

Agradecimientos

Se extiende el agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) y la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por el apoyo económico recibido para continuar mis estudios de posgrado en la maestría en ciencias mecatrónica con número “1316038”.

Referencias

- [1] J. R. Huerta-Rosales, D. Granados-Lieberman, J. P. Amezcua-Sanchez, D. Camarena-Martinez y M. Valtierra-Rodriguez, «Vibration Signal Processing-Based Detection of Short-Circuited Turns in Transformers: A Nonlinear Mode Decomposition Approach», *Mathematics*, p. 8(4), 2020.
- [2] IEEE, IEEE Std C37.91-2000: Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers, New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2000.
- [3] R. Madeiros y F. Costa, «A Wavelet-Based Transformer Differential Protection: Internal Fault Detection during Inrush Conditions», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33(6), pp. 2965-2977, 2018.
- [4] A. Orille-Fernández, N. Khalil, I. Ghonaim y J. Valencia, «A FIRANN as a Differential Relay for Three Phase Power Transformer Protection», *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 16 (Issue 2), 2001.
- [5] J. Liu, X. Fan, C. Zhang, C. Lai, Y. Zhang, H. Zheng, L. Lai y E. Zhang, «Moisture Diagnosis of Transformer Oil-Immersed Insulation with Intelligent Technique and Frequency-Domain Spectroscopy», *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17(7), pp. 4624-4634, 2021.
- [6] K. Fanchiang, Y. Huang y C. Kuo, «Power electric transformer fault diagnosis based on infrared thermal images using wasserstein generative adversarial networks and deep learning classifier», *Electronics (Switzerland)*, vol. 10(10), 2021.
- [7] M. Gutten, D. Korenciak, M. Kucera, R. Janura, A. Glowacz y E. Kantoch, «Frequency and time fault diagnosis methods of power transformers», *Measurement Science Review*, vol. 18, n° 4, pp. 162-167, 2018.
- [8] J. R. Huerta-Rosales, D. Granados-Lieberman, Garcia-Perez A., D. Camarena-Martinez, J. P. Amezcua-Sanchez y M. Valtierra-Rodriguez, «Short-circuited turn fault diagnosis in transformers by using vibration signals, statistical time features, and support vector machines on fpga», *Sensors*, vol. 21, n° 11, 2021.
- [9] M. Cabanas, M. Melero, C. Rojas, G. Orcajo, J.M. Cano, F. González, J. Normiella y S. Rozada, «Detection of Insulation Faults on Disk-Type Winding Transformers by means of Leakage Flux Analysis», *IEEE*, 2009.
- [10] M. Cabanas, F. Pedrayes, M. Melero, C. Rojas, G. Orcajo, J. M. Cano y J. Normiella, «INSULATION FAULT DIAGNOSIS IN HIGH VOLTAGE POWER TRANSFORMERS BY MEANS OF LEAKAGE FLUX ANALYSIS», *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 114, pp. 211-234, 2011.
- [11] S. C. Athikessavan, E. Jeyasankar, S. S. Manohar y S. K. Panda, «Inter-Turn Fault Detection of Dry-Type Transformers Using Core-Leakage Fluxes», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, n° 4, pp. 1230-1241, 2019.
- [12] X. Deng, Z. Zhang, H. Zhu y K. Yan, «Early fault diagnosis of transformer winding based on leakage magnetic field and DSAN learning method», *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, 2023.
- [13] S. J. Chapman, «Capítulo 2: Transformadores», de *Máquinas eléctricas*, Mc Graw Hill, 2000, pp. 61-117.
- [14] F. Anowar, S. Sadaoui y B. Selim, «Conceptual and empirical comparison of dimensionality reduction algorithms (PCA, KPCA, LDA, MDS, SVD, LLE, ISOMAP, LE, ICA, t-SNE)», *Computer Science Review*, vol. 40, p. 100378, 2021.

Herramientas etnográficas para un entendimiento regenerativo del lugar

Ethnographic tools for a regenerative understanding of place

García Hernández Danilo Daniel, Bartorila Miguel Angel

Maestría en Arquitectura, Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México.

dgarcia177@alumnos.uaq.mx miguel.bartorila@uaq.mx

Palabras clave: ARQ, etnografía, espacio público, desarrollo regenerativo, diseño regenerativo.

Resumen- El marco de trabajo y metodológico del diseño regenerativo fue establecido por *Regenes Group* y dispone de la aportación más significativa en cuanto a la caracterización del alcance y los principios fundamentales del desarrollo regenerativo como corriente de pensamiento. A pesar de desarrollar una metodología estructurada no define las herramientas e instrumentos metodológicos a aplicar para obtener información y resultados bajo los niveles de trabajo establecidos en su fase de Entendimiento del Lugar. El objetivo de este artículo es realizar una revisión bibliográfica para identificar que herramientas y métodos pueden implementarse en el marco de trabajo de diseño regenerativo para lograr completar esta fase metodológica. A través de esta revisión bibliográfica se concluye que se pueden implementar varios tipos de instrumentos y métodos en la fase inicial del marco de trabajo del diseño regenerativo, con el objetivo de cubrir todos los matices y escalas de acción necesarias para poder obtener una comprensión contextualizada del lugar, tomando en cuenta sus particularidades desde la base de que cada lugar presenta dinámica única y complementar las actividades de investigación previas.

Keywords: ARQ, ethnography, public space, regenerative development, regenerative design.

Abstract- The regenerative design framework and methodology was established by *Regenes Group* and has the most significant contribution in terms of characterizing the scope and fundamental principles of regenerative development as a school of thought. Despite developing a structured methodology, it does not define the methodological tools and instruments to be applied to obtain information and results under the levels of work established in its Understanding the Place phase. The objective of this article is to carry out a bibliographic review to identify which tools and methods can be implemented in the regenerative design framework to complete this methodological phase. Through this bibliographic review, it is concluded that several types of instruments and methods can be implemented in the initial phase of the regenerative design framework, with the objective of covering all the nuances and scales of action necessary to obtain a contextualized understanding of the place, taking into account its particularities from the basis that each place presents unique dynamics and complementing previous research activities.

1. Introducción

La incomprensión de los ecosistemas urbanos y la situación social decadente en nuestro

entorno ponen en una situación desventajosa a sus habitantes y al bienestar común de la sociedad [1], [2]. Las ciudades actuales están carentes de una verdadera integración con la naturaleza, lo que amenaza a la biodiversidad

y a la relación entre la humanidad y el entorno natural se encuentra en riesgo [3]. Cambiar el paradigma de las ciudades desempeña un desafío mayor en estos tiempos, la gran mayoría de estas ciudades contemporáneas carecen de elementos naturales en gran extensión de sus urbes; lo que las principales ciudades del mundo están empezando a implementar sistemas urbanos regenerativos y biofílicos en la planificación y diseño de los espacios urbanos para restaurar y gestionar sistemas naturales en las grandes metrópolis[4]. Los enfoques regenerativos buscan no sólo revertir la situación actual de degeneración de los sistemas naturales, sino también configurar sistemas donde los humanos puedan coevolucionar con los sistemas naturales, esta relación entre los sistemas ecológicos y socioculturales propicia un contexto cualitativamente diferente para desarrollar la práctica arquitectónica desde un enfoque que difiere del modelo convencional y la conformación de ecosistemas urbanos [5], [6].

El campo del desarrollo y diseño regenerativos se fundamenta habilidades innatas de los organismos vivos naturales de autocuración y autoorganización de los sistemas vivos, se considera cada vez más como una fuente para lograr este fin [7]. La metodología de este enfoque queda descrita en el libro “Regenerative Development and Design: a framework for evolving sustainability” [5] y en “Designing from Place: A Regenerative Framework and Methodology” [8]. A pesar de desarrollar una metodológica estructurada no resulta del todo claro como metodológicamente se pudieran obtener información y resultados bajo los niveles de trabajo establecidos, esto se debe a que el marco de trabajo posee una perspectiva que reconoce cada lugar como único [5].

Concretamente en la fase de lectura y entendimiento del lugar es fundamental saber que herramientas se van a utilizar según se

estime para poder comprender las dinámicas en las distintas escalas de anidamiento; para desarrollar el trabajo en la esfera de control donde se va a realizar el proyecto se necesita una comprensión de las dinámicas y actividades sociales que se desarrollan en el sitio.

La práctica etnográfica como método de investigación cualitativa ha desarrollado muchas herramientas que permiten la recopilación de información para complementar el trabajo en esta etapa, el objetivo de este artículo es realizar una revisión de que herramientas etnográficas se pueden utilizar para realizar el trabajo de campo en la fase de entendiendo y lectura del lugar en el marco de trabajo del diseño regenerativo.

2. Metodología

Para poder identificar que herramientas, instrumentos o métodos se pudieran implementar para poder comprender la esencia del lugar desde el marco de trabajo del diseño regenerativo, se realiza una investigación documental, el cual integra la definición de criterios de búsqueda y selección de la información, lectura, análisis y codificación de datos [9].

a) Búsqueda Inicial.

La primera búsqueda se realizó en septiembre de 2024 combinando los términos “Ethnography” y “design” en la base de datos Scopus. Posteriormente se amplió la búsqueda probando otras combinaciones según conviniera usando los operadores booleanos *AND* y *OR* con los términos “ethnographic tool”, “Ethnography”, “Observation tool”, “Urban”, “Cities”, “Regenerative”, “Biophilia” y “Design”. Esta búsqueda brindó resultados variados, en su mayoría inabarcables para realizar una revisión detallada de los resultados. Se realizó un

primer análisis a través de palabras claves para definir cuáles eran los que arrojaban resultados de interés, luego algunos de estos terminaos nos brindaron resultados finales similares y repetido.

b) Revisión.

La búsqueda de información en las bases de datos, parte de los parámetros presentados en la Tabla 1.

PARÁMETROS Y BASES DE DATOS EN LA INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

bases de datos	Scopus
Prototipo de búsqueda	ethnographic tool* AND design*
CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD	
Temporal	2014-2024
Áreas	Ciencias Sociales, Ingeniería, Ciencia Ambiental y Artes y Humanidades
Tipo de fuente	Libros, Capítulo de libro, Congresos o Artículos de estudios empíricos.
Pertinencia	El título, resumen o palabras clave deben contener las dos palabras del prototipo de búsqueda.
Idioma	Español e Inglés

Tabla 1. *Elaboración propia.*

La combinación de términos que arrojo resultados más representativos fue: (TITLE-ABS-KEY ("ethnographic tool") AND TITLE-ABS-KEY (design)). Esta búsqueda arrojo como resultado 27 documentos encontrados en la base de datos de Scopus.

Se delimito la búsqueda a una temporalidad de 10 años de 2014-2024 así como el área temática limitadas a las ciencias sociales y la ingeniera, acotando los resultados a 16 documentos con los siguientes operadores boléanos (TITLE-ABS-KEY ("ethnographic tool") AND TITLE-ABS-KEY (design))

AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "SOCI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")).

Antes de proceder a la selección de artículos se definieron los criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de Inclusión

- Investigaciones aplicadas o empíricas, estudio de casos, libros o manuales no revisiones.
- Que utilicen herramientas etnográficas no importa el contexto específico.
- Que desarrollen herramientas o instrumento de trabajo para realizar o mejorar investigaciones de campo.

Criterios de exclusión

- Se excluyen los resultados que se centren en la obtención de datos individuales a través de auto-etnografías.
- Los que apliquen herramientas etnográficas con objetivos de medir percepción de riesgo para desastres naturales.
- Que la estructura de las herramientas etnográficas identificadas como encuestas sean utilizables según los criterios metodológicos del diseño regenerativo en la fase de entendimiento del lugar.

c) Elegibilidad.

Se sondearon los títulos y los resúmenes de los resultados arrojados basado en la compatibilidad con el área de interés y se descartaron 8 documentos, a estos se les realizo un análisis más detallado enfocado en los métodos empleados para acometer la investigación, porque a pesar de que no estaba relacionado con el tema de investigación podrían implementar herramientas que se

pudieran replicar en otros contextos y áreas de estudio. Arrojando resultados a tener en cuenta.

De este análisis de inclusión se agregan 2 artículos, quedando descartados 6 escritos para un resultado final de 10 artículos que cumplieron los criterios de inclusión y se seleccionaron para hacer la revisión final reflejados en la Tabla 2.

Tabla 2. *Documentos finales para realizar la discusión y revisión (Base de datos Scopus). Elaboración propia.*

Año	Autor	Título
2024	Lau, Justin Chun-Him; Cheng, Michelle W. T.	Cultural probes: a speculative and creative method for environmental research.
2022	Al-Madani, Wafa	Urban Landscape Spaces and Migrants' Everyday Experiences in Bahrain.
2021	Lake, Danielle; Flannery, Kathleen; Kearns, Morgan	A Cross-Disciplines and Cross-Sector Mixed-Methods Examination of Design Thinking Practices and Outcome.
2021	Cobrerros, Carlos; Maya, Mariana; Biondi, Stefania; Sánchez X.; Ontiveros-Ortiz E.	Re-signify the domestic space in times of confinement from the application of ethnographic tools and personal centered design
2020	Charbonneau-Gowdy, Paula; Salinas, Danisa	Test-run: Mediating changes to online assessment practices in a teacher education setting.
2019	Cloonan, Anne;	Promoting teachers' agency

	Hutchison, Kirsten; Paatsch, Louise	and creative teaching through research.
2019	Maya, Mariana; Cobrerros, Carlos; Ontiveros, Elsa; Biondi, Stefania	Community collaboration for product Design (Co-Co design): An academic alternative for social innovation.
2019	Andersen, Karen; Balbontín, Sofia	Citizen participation in movement: Methodology of commented tours through the Universidad de Magallanes, Punta Arenas.
2017	Mack, Jennifer	The construction of equality: Syriac immigration and the Swedish City.
2014	Aguilar Delgado, Natalia; Barin Cruz, Luciano	Multi-event ethnography: doing research in pluralistic settings

3. Resultados y discusión.

De los 10 artículos que cumplieron los criterios de inclusión se excluyen 3 documentos que se consideraron no utilizables en su implementación de como herramientas etnográficas para el entendimiento del lugar en la metodología del diseño regenerativo. Son los siguientes: A Cross-Disciplines and Cross-Sector Mixed-Methods Examination of Design Thinking Practices and Outcome, el diseño de la herramienta etnografica no es replicable en otros contextos; Promoting teachers' agency and creative teaching through research, las herramientas empleadas se aplicaron para revelar interacciones entre métodos para la capacidad de acción docente; y The construction of equality: Syriac

immigration and the Swedish City, no describe ni caracteriza los instrumentos que emplea.

a) Análisis cualitativo.

En esta fase se realiza un análisis cualitativo de los métodos aplicados en cada documento.

a.1. Título: Cultural probes: a speculative and creative method for environmental research.

Descripción: Desarrolla como las investigaciones culturales pueden obtener datos cualitativos y analíticos a través de un estudio empírico de desechos de estudiantes universitarios [10].

Herramienta: Sondas culturales como método experimental donde los participantes perciben la realidad en la que viven lo que proporciona un mejor diálogo entre investigador y el investigado [10]. Se puede emplear para recopilar hechos objetivos pues compendia datos que la herramienta tradicional no llegan a abarcar e incita a los participantes a compartir o reflexionar sobre eventos reveladores de la vida cotidiana [11].

a.2. Título: Urban Landscape Spaces and Migrants' Everyday Experiences in Bahrain.

Descripción: Este documento se centra en analizar las preferencias, actividades regulares y estimulaciones de los inmigrantes temporales, para identificar comportamientos socio-espaciales y de cómo las tipologías de los espacios públicos modifican las experiencias multisensoriales de los mismos [12].

Herramienta: Se desarrolló una investigación cualitativa que integraba herramientas etnográficas de observación y entrevista para apoyar un trabajo de gabinete previamente realizado. Se realizaron sesiones de observación que abarcaban diferentes horas, días y meses del año para identificar las actividades y su relación con los elementos del

entorno publico apoyado de entrevistas in situ [12].

a.3. Título: Re-signify the domestic space in times of confinement from the application of ethnographic tools and personal centered design.

Descripción: Experimentar con herramientas etnográficas para analizar como habitamos los espacios domésticos en un contexto de confinamiento [13].

Herramientas:

Microetnografías: se concentra en aspectos concretos durante un periodo de tiempo corto y agrega un valor espacial que descubre particularidades relevantes [14].

Mapeo Cognitivo Social: Los participantes cuentan una historia y dinámicas a través de medios visuales y poder brindar información espacial del área de estudio [15].

Mapeo de Experiencias: permite generar una relación entre el contexto con las emociones y actividades del habitante [16].

a.4. Título: Test-run: Mediating changes to online assessment practices in a teacher education setting.

Descripción: Este trabajo busca el reconocimiento de las evaluaciones en línea para promover los enfoques pedagógicos del aprendizaje, probándolo en un entorno de formación de futuros profesores [17].

Herramienta: Se utilizan herramientas etnográficas como instrumentos de recolección de datos, método de observación participante [18] apoyado con notas de campo [19] y entrevistas grupales e individuales [20].

a.5. Título: Community collaboration for product design (co-co design): An academic alternative for social innovation.

Descripción: Una propuesta multidisciplinaria que reúne a estudiantes de diferentes ramas para abordar problemas y desafíos sociales para la decisión de un diseño colaborativo viable [21].

Herramienta: Maneja herramientas etnográficas para comprender dinámicas e historias personales para integrarlo al proceso de co-diseño final, apoyándose en la herramienta de microetnografías para poder debelar los aspectos particular de la comunidad local [14].

a.6. Título: Citizen participation in movement: Methodology of commented tours through the Universidad de Magallanes, Punta Arenas.

Descripción: Profundiza en la confecciones prácticas y teóricas en los benéficos de la participación urbana específicamente en la etapa de diagnóstico [22].

Herramienta: Implementa la herramienta metodológica del recorrido comentado para recolectar información a partir de un paseo guiado en el lugar de estudio, consiste en caminar, percibir y describir [23].

a.7. Título: Multi-event ethnography: doing research in pluralistic settings.

Descripción: Investiga la realización de etnografías de múltiples eventos en entornos pluralistas aplicando etnografías tradicionales [24].

Herramienta: Implementa métodos tradicionales para conformar el método de observación participante.

Shadowing: Es una técnica itinerante que le permite descubrir al investigador lugares a los que en circunstancias normales no iría, proporciona la comprensión de las acciones y relaciones con los actores [25].

Diario del Participante: Brinda información para comprender de qué manera el habitante

percibe, ve y describe los acontecimientos en su rutina diaria [26].

Diario reflexivo: Se unifican las notas de campo con dudas o preocupaciones, ayuda a reflexionar sobre la participación que justifica opciones metodológicas y refleja contradicciones del practicante [27].

Conclusiones

La conclusión de la presente revisión realizada expone que las herramientas etnográficas son instrumentos fundamentales para el entendimiento, comprensión y lectura del lugar siendo parte fundamental para lograr el cumplimiento de la Fase 1 del marco metodológico del diseño regenerativo [5], [8]. Todas las herramientas etnográficas identificadas, teniendo en cuenta las características del contexto y el alcance de la investigación, pueden ser implementadas en la etapa de trabajo de campo bajo el marco de trabajo del diseño regenerativo, ya que son complementarias entre ellas y pueden ser empleadas en diferentes escalas, posibilitando incluso la implementación de las mismas en talleres etnográficos con variedad de participantes. Entre las herramientas más relevantes, las microetnografías, el diario reflexivo y las sondas culturales facilitan un análisis más cercano y reflexivo entre los participantes y el investigador. Asimismo, los métodos de recorrido comentado y mapeo cognitivo aportan una visión experiencial y espacial que ayuda a la comprensión las relaciones entre las actividades y emociones con el entorno físico. El empleo de instrumentos y técnicas como el shadowing y el diario del participante agregan otra capa de complejidad a través de una observación más profunda, proporcionándole al investigador recopilar información sobre las actividades que realizan los participantes de manera asidua y también reflexionar sobre el propio proceso de investigación, ya que proporciona una perspectiva itinerante y participativa,

enriqueciendo la comprensión de los sistemas urbanos desde un enfoque más humano. Por último, esta revisión destaca la importancia de conocer que herramientas etnográficas se adapten de mejor manera a las particularidades del lugar ya que cada entorno es único [5] y requiere una adaptación metodológica flexible, además de poder identificar qué información se necesita extraer según la percepción del investigador para complementar las actividades de trabajo de gabinete previamente realizadas en la investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia, Humanidades y Tecnología y a la Universidad Autónoma de Querétaro por los recursos otorgados para la realización de esta investigación.

Referencias

- [1] M. E. de la Torre Escoto, M. Á. Bartorila, y J. J. A. González, «Ecotonal Situations and Ecosystem Services: Environmental Health in the Barranca del Río Grande de Santiago. Guadalajara Metropolitan Area, Mexico», *Urbe*, vol. 14, 2022, doi: 10.1590/2175-3369.014.e20210357.
- [2] G. Díaz Cordero, «El Cambio Climático», *Cienc. Soc.*, vol. XXXVII, n.º 2, Art. n.º 2, 2012, [En línea]. Disponible en: <https://intranetrepository.intec.edu.do/server/api/core/bitstreams/3bacdd56-e4ef-4b1f-a2eb-d5cced4f44aa/content>
- [3] T. Beatley y P. Newman, «Biophilic Cities Are Sustainable, Resilient Cities», *Sustainability*, vol. 5, n.º 8, Art. n.º 8, ago. 2013, doi: 10.3390/su5083328.
- [4] E. L. M. Wolfs, «Biophilic Design and Bio-Collaboration», *Arch. Des. Res.*, vol. 113, n.º 1, Art. n.º 1, feb. 2015, doi: 10.15187/adr.2015.02.113.1.71.
- [5] P. Mang y B. Haggard, *Regenerative Development and Design: A Framework for Evolving Sustainability*. John Wiley & Sons, 2016.
- [6] D. D. G. García, E. Molina-Santana, J. M. Álvarez-Alvarado, J. C. R. Ceballos, y M. L. Osorio, «Proposing a New Vision for Understanding Cities through Co-evolutionary Processes», *Univ. Soc.*, vol. 16, n.º 2, Art. n.º 2, mar. 2024.
- [7] P. Mang y B. Reed, «Regenerative Development and Design», 2020, pp. 115-141. doi: 10.1007/978-1-0716-0684-1_303.
- [8] P. Mang y B. Reed, «Designing from place: a regenerative framework and methodology», *Build. Res. Inf.*, vol. 40, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2012, doi: 10.1080/09613218.2012.621341.
- [9] T. D. Pigott y J. R. Polanin, «Methodological Guidance Paper: High-Quality Meta-Analysis in a Systematic Review», *Rev. Educ. Res.*, vol. 90, n.º 1, pp. 24-46, 2020.
- [10] J. C.-H. Lau y M. W. T. Cheng, «Cultural probes: a speculative and creative method for environmental research», *Local Environ.*, vol. 29, n.º 3, pp. 386-398, mar. 2024, doi: 10.1080/13549839.2024.2310658.
- [11] J. Wallace, J. McCarthy, P. C. Wright, y P. Olivier, «Making design probes work», en *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, en CHI '13. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, abr. 2013, pp. 3441-3450. doi: 10.1145/2470654.2466473.
- [12] W. Al-Madani, «Urban Landscape Spaces and Migrants' Everyday Experiences in Bahrain», 2022.
- [13] C. Cobreros, M. Maya, S. Biondi, X. Sánchez, y E. Ontiveros-Ortiz, «Re-signify the domestic space in times of confinement from the application of ethnographic tools and personal centered design», en *DS 110: Proceedings of the 23rd International Conference on Engineering and*

- Product Design Education (E&PDE 2021)*, VIA Design, VIA University in Herning, Denmark. 9th -10th September 2021, 2021. doi: 10.35199/EPDE.2021.83.
- [14] A. Bryman, *Social Research Methods*. Oxford University Press, 2016.
- [15] G. M. P. Escalante y D. J. Sánchez-Aquino, «Mapas Cognitivos», *Bol. Científico Las Cienc. Económico Adm. ICEA*, vol. 7, n.º 14, Art. n.º 14, jun. 2019, doi: 10.29057/icea.v7i14.3986.
- [16] S. Samson, K. Granath, y A. Alger, «Journey Mapping the User Experience | Samson | College & Research Libraries». Accedido: 25 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://crl.acrl.org/index.php/crl/article/view/16641>
- [17] P. Charbonneau-Gowdy y D. Salinas, «Test-Run: Mediating Changes to Online Assessment Practices in a Teacher Education Setting - ProQuest». Accedido: 25 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.proquest.com/openview/f2cc6c99e56b98e26df5be5f0901e093/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1796419>
- [18] E. Piñeiro Aguiar, «Revista San Gregorio», <http://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO>. Accedido: 25 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/information/authors>
- [19] L. A. Martínez, «La Observación y el Diario de Campo en la Definición de un Tema de Investigación.», 2007.
- [20] M. S. Valles, *Entrevistas cualitativas*. CIS, 2007.
- [21] M. Maya, C. Cobreros, Ontiveros, Elsa (2), D. Evans, y H. Grierson, «Community Collaboration for Product Design (Co-Co Design): an Academic Alternative for Social Innovation».
- [22] K. Andersen y S. Balbontín, «Participación ciudadana en movimiento: Metodología de recorridos comentados por la Universidad de Magallanes, Punta Arenas.», *AUS Arqut. Urban. Sustentabilidad*, n.º 25, Art. n.º 25, ene. 2019, doi: 10.4206/aus.2019.n25-06.
- [23] J.-P. Thibaud, «Parcours commentés», 2022, Accedido: 25 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hal.science/hal-03500403>
- [24] N. Aguilar Delgado y L. Barin Cruz, «Multi-event ethnography: doing research in pluralistic settings», *J. Organ. Ethnogr.*, vol. 3, n.º 1, pp. 43-58, ene. 2014, doi: 10.1108/JOE-11-2012-0050.
- [25] B. Czarniawska-Joerges, *Shadowing: And Other Techniques for Doing Fieldwork in Modern Societies*. Copenhagen Business School Press DK, 2007.
- [26] T. B. Zilber, «Institutional Multiplicity in Practice: A Tale of Two High-Tech Conferences in Israel», *Organ. Sci.*, vol. 22, n.º 6, pp. 1539-1559, 2011.
- [27] J.-L. Denis, A. Langley, y L. Rouleau, «Strategizing in pluralistic contexts: Rethinking theoretical frames - Jean-Louis Denis, Ann Langley, Linda Rouleau, 2007». Accedido: 25 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0018726707075288>

Propuesta de diseño de inteligencia artificial para potencial determinación de analitos simultánea en sudor humano

Desing proposal of an artificial intelligence for potential simultaneous analyte determination for human sweat

Estrada-Orsorio, D.V.

*División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Santiago de Querétaro, México
dulce.estrada@uaq.mx*

Palabras clave: IAR, inteligencia artificial, filtro, multisensor, microfluídica, sudor humano

Resumen- En este trabajo se presenta una propuesta de diseño de un algoritmo de inteligencia artificial para determinar acertadamente la concentración de analitos de interés en sudor humano mediante la alimentación de resultados experimentales de sensores electroquímicos.

El algoritmo de River Formation Dynamics (RFD) propone una toma de decisiones atractiva debido al uso de parámetros como bandas de confianza propuestos como distancia entre nodos, esto genera una interpretación de los datos de forma lo más real posible, ya que los sensores no son completamente repetibles. Este tipo de implementación multidisciplinaria pretende que los sensores para condiciones médicas aumenten su certidumbre y evalúen de forma autónoma las potenciales enfermedades gracias al análisis simultaneo de interferentes.

Keywords: IAR, artificial intelligence, filter, multisensor, microfluidics, human sweat

Abstract- In this works a design of an algorithm based on artificial intelligence is presented, to determine the analyte concentration on human sweat feed through experimental results from electrochemical sensors.

River Formation Dynamics (RFD) algorithm proposes an attractive option due to the application of parameter such as confidence bands proposed as distance between nodes, this generates a close to reality interpretation and inference of the data, due to sensors not being totally repeatable. This multidisciplinary implementation pretends to optimize sensors for medical conditions detection to increase certainty and autonomously evaluate potential diseases due to the simultaneous analysis of interferents in sweat.

1. Introducción

El sudor es uno de los fluidos que se pueden obtener mediante procesos no invasivos (sin penetración en la piel o membranas mucosas) lo que evita heridas o extracción de sangre, etc.). Mediante el análisis en la composición del sudor se puede obtener información de la condición fisiológica del cuerpo humano, sobre la salud y el bienestar del individuo [1], [2], [3].

Actualmente se pueden detectar y cuantificar diferentes analitos encontrados en el sudor tales como glucosa [4], cloruros [5], ácido úrico [6], etc., asociados a diferentes enfermedades o padecimientos [7], [8], [9].

La forma más eficaz de realizar la detección y cuantificación de estos analitos es mediante el uso de sensores electroquímicos [10], [11], [12], [13], los cuales de acuerdo con su naturaleza pueden ser potenciométricos o amperométricos y que se miden mediante un equipo especializado llamado potenciostato.

En el caso del primer tipo, se presenta una reacción química debido a la interacción entre la especie en el sensor y la sustancia de interés con el analito, obteniendo un cambio en el potencial del sensor [14]. Para el caso del segundo, al sensor se le aplica un potencial eléctrico (V) para fomentar la interacción química (sensor y sustancia) y obtener un cambio en la corriente del sensor respecto a la concentración del analito [15].

En los últimos años se ha tenido un gran avance en la generación de materiales electroquímicos que puedan funcionar como sensores portátiles y no invasivos, sin embargo, estos avances se han enfocado principalmente en la síntesis de materiales biosensores de alta especificidad y sensibilidad [16], [17], [18]. Teniendo en cuenta que sus aplicaciones apuntan a biofluidos donde convergen infinidad de elementos o moléculas, son características principales en los sensores, sin embargo, la nula interferencia de estos elementos no se ha logrado en los materiales hasta la fecha encontrados.

Debido a la gran cantidad de datos que se pueden obtener, se ha optado por integrar tecnologías de inteligencia artificial (IA) como machine learning (ML) a estos sensores para manejar la información [19].

Principalmente la aplicación de IA en estos sistemas se ha dedicado a entrenar el programa de forma que sea capaz de predecir algún fallo o posible inconsistencia en las señales, sin embargo, es sabido que, al manejar muestreos en tiempo real, involucra la interferencia de múltiples factores y que mediante IA pudiera aportar en limpiar o discriminar información no deseada [25], [26].

Estos sistemas se acoplan a un circuito electrónico que obtiene y procesa la información respecto a lo experimentalmente obtenido, sin embargo, generalmente no se toman en cuenta los posibles interferentes ambientales, ruidos o variaciones de las condiciones experimentales en

el programa de interpretación de datos [27], [28], [29].

A pesar de todo el progreso generado en el campo de ML, sólo pocas aplicaciones se ha discutido respecto a su aplicación en electroquímica, principalmente debido a que por sí solas las pruebas electroquímicas como voltamperometría cíclicas o cronoamperometrías, presentan sólo dos cantidades, voltaje y corriente en la primera y corriente y tiempo en la segunda [26].

Existen múltiples metodologías que se pueden utilizar en el desarrollo de IA aplicadas a tareas específicas, sin embargo, el algoritmo de River Formation Dynamics (RFD) traducido a Formación Dinámica de Ríos, este algoritmo se basa en optimización heurística que copia la forma en la que el agua forma los ríos al erosionar la tierra y depositando sedimentos. Esta dinámica modifica el ambiente al cambiar las altitudes del suelo y que las demás gotas puedan seguir el mismo camino.

Este algoritmo tiene ventaja ya que, en lugar de asociar, por ejemplo, feromonas a los valores límite (como en el caso de Ant Colony Optimization (ACO), se asocia la altitud a los valores de los nodos. La probabilidad de que una gota tomen un límite en lugar de otros es proporcional al gradiente de la pendiente en el límite y depende de las distancias entre nodos. Esta probabilidad se puede asociar directamente a la desviación estándar y a las bandas de confianza que se obtienen de las curvas de calibración de los sensores, por lo que proponen una opción atractiva.

2. Metodología

Análisis de técnicas electroquímicas

Existen múltiples años de investigación dedicados a las técnicas electroquímicas que han resultados en trabajos con explicaciones profundas al respecto, sin embargo, sin

conocimiento previo de la electroquímica como ciencia es complejo su entendimiento.

Mediante la técnica de CA es posible obtener información como coeficientes de difusión, constantes de Michaelis-Menten, corrientes relacionadas a concentraciones, etc. Esta información se obtiene a partir de la repetición constante de las pruebas bajo las mismas condiciones, lo cual genera alta complejidad en la realización de los experimentos.

Debido a esta repetición constante, la cantidad de datos para entrenamiento son considerables para poder desarrollar una simulación numérica que, utilizando ML, genera modelos con excelentes aproximaciones.

De forma metodológica los sensores electroquímicos generan señales eléctricas que son analizadas desde potenciostatos o circuitos electrónicos específicos. Estas señales al ser procesadas asignan un valor de concentración del analito respecto a la señal de acuerdo con lo observado en las curvas de calibración obtenidas del sensor. Sin embargo, no se toman en cuenta parámetros como bandas de confianza, reproducibilidad del sensor o condiciones fuera de lo esperado en el experimento.

Señales de interferentes presentes en la solución a analizar se presentan, de acuerdo con el sensor cada interferente se puede asociar a una señal (de potencial o corriente) de forma paralela a la señal generada por el analito de interés.

Aplicación de ML para sensores electroquímicos

Para este caso se propone un modelo que analice las condiciones de una prueba de CA (con resultados conocidos) que permita extraer cantidades o información relevante para el cálculo de concentraciones del analito presente en la muestra.

De forma experimental la técnica de OCP mide el potencial en el sistema, sin embargo, de forma teórica el modelo de ML debería ser capaz de

realizar lo mismo que se explicó anteriormente, inferir acertadamente la concentración del analito en la solución utilizando información conocida a partir de la información experimental, sin tomar en cuenta información de cualquier otro componente o molécula presente en dicha solución.

Si bien el modelo se especifica para en análisis de resultados obtenidos de pruebas de OCP y CA, fácilmente podrían aproximarse a métodos generales de electroquímica fundamental. Específicamente se toma en cuenta la información experimental de 4 sensores en específico: dos amperométricos [16], [17] y dos potenciométricos [13], [30] que trabajen de forma simultánea.

En la Fig. 1 se ilustra el proceso de entrenamiento de la ML. El proceso general de entrenamiento consiste en tres partes principales: generalidades de los datos de entrenamiento, el entrenamiento mediante un aprendiz supervisado utilizando la información experimental y finalmente el procesamiento del aprendiz sin supervisión obteniendo retroalimentación.

En el primer paso se deben discernir inicialmente los datos de entrenamiento para el algoritmo, entre ellos y los de mayor relevancia los fenómenos electroquímicos que rigen cada sistema, es decir constantes de Michaelis-Menten si existen sensores enzimáticos, ecuaciones de Nernst para sensores potenciométricos, transferencia de masa en caso de existir entre otros.

En la Tabla 1 se especifican los parámetros bajo las que se rige cada sistema, de igual forma se muestran las condiciones experimentales, así como los resultados, todos estos como parámetros de entrada del sistema.

Posteriormente el aprendiz es entrenado mediante esta información con la finalidad de determinar la corriente o el potencial eléctrico específico de cada concentración en el medio.

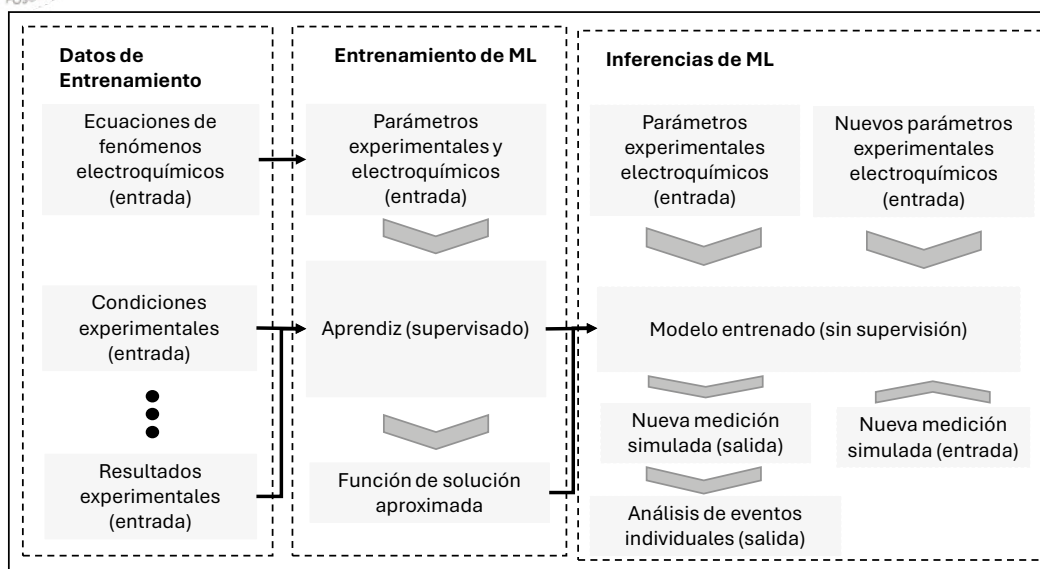


Fig. 1: Proceso de entrenamiento de Machine Learning propuesto.

De forma experimental, éstas señales se obtienen en un medio expuesto a interferentes por lo que la información obtenida ya contempla éstos y cualquier anomalía puede considerarse como una variación en las concentraciones de analitos no deseados en el sensor o un cambio en las condiciones experimentales evaluados como eventos individuales.

Para el último paso el modelo se utiliza para analizar la información otorgada de forma experimental y evaluar anomalías (interferentes). Específicamente hablando se debe generar la correlación entre pH del medio (5.6 estándar para sudor sintético, pero puede variar), la concentración del analito y la respuesta eléctrica (corriente o potencial) obtenido en un tiempo determinado. Estas variaciones se obtienen mediante la obtención de las pendientes de las curvas de calibración de los sensores [31].

Para cada sensor las pendientes (Tabla 1) representan el valor de potencial o corriente, según sea el caso, respecto a cada concentración analizada, así como la posible variación (coeficiente de determinación) que permite saber en qué rango puede variar esta señal dentro de una misma concentración.

Las concentraciones de los interferentes varían constantemente respecto a la dieta o condición fisiológica del individuo sin embargo se estandarizan algunos a las concentraciones presentadas en la Tabla 2. Cada uno de ellos puede asociarse a una corriente o potencial de acuerdo con el sensor utilizado, sin embargo, en los trabajos se muestran sólo algunos.

Se han reportado diferentes procesos automatizados o semi-automatizados [33] del análisis de los resultados de estas pruebas, que pueden ayudar a disminuir potencialmente los errores en el análisis, sin embargo, no distinguen de señales de ruido interferentes por lo que se mantiene complejo el interpretar la información obtenida sin conocimiento de los fenómenos electroquímicos generados en la superficie de los sensores.

De forma general el algoritmo deberá recibir señales de corriente y potencial respecto al tiempo. Estas señales deberán asociarse a la concentración del analito respecto a lo obtenido de forma experimental. Por ejemplo el sensor de ácido úrico deberá enviar una señal constante cercana a $14 \text{ J}/\mu\text{A cm}^{-2}$ cuando exista una concentración de $100 \mu\text{M}$ (con una R^2 de 0.99 y una desviación estándar de 0.21%) en la muestra de sudor, sin embargo este sensor presenta una

Tabla 1: Parámetros de sensores

Analito	Sensor	CEx	Pendiente	R.L.	Ecuación	Ref.
Ácido úrico	Ni-Co/UOx	0.1 M PBS pH 5.6 400mV	$y=0.0109x+0.0948$	0-100 μ M	Michaelis-Menten (24.8 μ M)	[16]
Cloruros	Ag/AgCl	Sudor humano	$y=51.12 \pm 0.45$ mV	0.05-50 mM	Nernst	[30]
Potasio	ISE	TRIS buffer	51.1 mV/dec	12 μ M – 1.6 mM	Ajuste lineal	[13]
Glucosa	Fe-PLL/GOx	0.1M PBS 360 mV	6.8x+11.7	0-10 mM	Ajuste lineal	[17]

interferencia respecto a ácido ascórbico en aproximadamente 20% es decir, que por cada 60 μ M de ácido ascórbico en la solución se genera una variación del 20% en esta señal, por lo que el algoritmo deberá discernir la señal que corresponde al analito de acuerdo al entrenamiento.

De esta forma deberá asociar la concentración (que de forma teórica es desconocida) a la señal obtenida tomando en cuenta todas las diferentes condiciones y teniendo en cuenta las señales de cada sensor de forma independiente.

3. Discusión del modelo

Existen diferentes pruebas electroquímicas que se vuelven compatibles con diferentes algoritmos de ML de acuerdo con la información obtenida. En este caso se propone un modelo de datos de

primer orden (o unidimensional) debido a que las técnicas de OCP y CA obtienen información respecto a variables independientes y dependientes que pueden ser tratadas como vectores, potencial vs tiempo y corriente vs tiempo respectivamente.

Tabla 2: Principales interferentes en sudor [32]

Analito	Media (M)	Analito	Media (M)
<i>Electrolitos primarios</i>		<i>Aminoácidos</i>	
Sodio	3.1×10^{-2}	Alanina	3.6×10^{-4}
Cloruros	2.3×10^{-2}	Arginina	7.8×10^{-4}
Calcio	5.2×10^{-3}	Glicina	3.9×10^{-9}
Potasio	6.1×10^{-3}	Ácido úrico	5.9×10^{-5}
<i>Constituyentes iónicos</i>		Urea	1.0×10^{-2}
Fósforo	1.3×10^{-5}	Creatina	1.5×10^{-5}
Sulfato	4.2×10^{-4}	<i>Vitaminas</i>	
Hierro	9.8×10^{-6}	Riboflavina	2.0×10^{-2}
Ácido láctico	1.4×10^{-2}	Ácido nicótico	4.1×10^{-1}
Glucosa	1.7×10^{-4}	Tiamina	5.0×10^{-3}
Zinc	1.3×10^{-5}	Ácido fólico	1.6×10^{-8}
Manganeso	1.1×10^{-6}	Ácido ascórbico	1.0×10^{-5}

Estos datos se pueden tratar mediante análisis de datos multiderivativo por ejemplo de análisis de componente principal (PCA) o de regresión (PCR) [35]. Específicamente el uso de una sub clasificación de algoritmos ML son los determinados por los “Vecinos más cercanos a K ” (KNN por sus siglas en inglés) en el que los puntos del grupo se grafican en el espacio o espacio transformado. Cada que un nuevo punto se alimenta al algoritmo se buscará el punto más cercano a K .

Utilizando esta aproximación se propone un algoritmo basado en la formación de ríos (RFD) propuesto por [36]. Debido que es relativamente sencillo se busca una K apropiada (simulando la concentración), las propiedades de la malla de nodos (condiciones experimentales) y la transformación de datos en gotas (corrientes o potenciales obtenidos del análisis experimental),

mismos que deberán tener el soporte bien definido.

RFD para sensores electroquímicos.

En la Fig. 2 se muestra el esquema básico del algoritmo propuesto basado en el algoritmo de RFD. En este algoritmo las gotas realizan su camino al realizar una comparación de alturas entre el nodo donde se encuentra la gota y el nodo adyacente al que se desea mover. Mediante esta regla de transición se define la probabilidad de que una gota k caiga en un nodo j dependiendo también de la distancia entre los nodos (pendiente de curvas de calibración) como se describe en (1):

$$\text{gradDecreciente}(i, j) = \frac{\text{altitud}(j) - \text{altitud}(i)}{\text{distancia}(i, j)} \quad (1)$$

```

Inicia poblaciones()
valorPenalización()
while (not GotasSiguenMismoCamino()) and (not
otraCondición())
    moverGotas()
    evaluarCamino()
        evaluaFunción()
        restricciones()
        obtieneRaíces()
    erosiona()
    sedimenta()
    caminosLimitados()
end while

```

Fig. 2: Esquema básico del algoritmo RFD

Principalmente el algoritmo realiza las actividades en los siguientes pasos:

1. La gota “encuentra una solución”. En este punto la gota encuentra un camino para atravesar todos los nodos pasando a través de cada nodo sólo una vez y regresando al nodo origen. En este camino la gota erosiona el camino seguido. Aquí se toman decisiones de a que concentración corresponde la señal.
2. La gota se “evapora”. Esto se hace cuando la gota no encuentra una solución debido a que, en un determinado momento, todos los nodos

adyacentes fueron visitados. En este caso la gota no contribuye información a la solución y no erosiona. Este comportamiento puede deberse a una señal interferente o alguna falla en la lectura.

3. La gota “deposita sedimento”. Esta acción se lleva a cabo cuando la gota no encuentra solución, porque la altitud de todos los nodos adyacentes es más alta que la altitud del nodo actual. En este caso la gota deposita sus sedimentos en este nodo valle e incrementa su altitud. Es decir que la gota discrimina los caminos que correspondan a interferentes o concentraciones no relacionadas a la señal.
4. Por último, el camino se guarda al “analizar recorridos” y repasar las soluciones encontradas (concentración del analito) y guardar únicamente la mejor solución. Es decir, dentro de las posibles concentraciones, se establece una (de forma puntual o intervalo) que corresponde a la señal de entrada.

Este código busca imitar la formación de ríos tomando en cuenta por ejemplo alturas de nodos de camino que pudieran asociarse a valores de interferentes o a valores de concentraciones. Así mismo hay que tomar en cuenta las desviaciones estándar de los sensores que pueden atribuirse a estas alturas para no discriminar tan fácilmente una concentración.

Validación de propuesta aplicada

El uso de ML puede ayudar a desarrollar sensores para superar las complicaciones, aunque por los procesos utilizados para la fabricación de los sensores, es difícil aproximarse al diseño lo suficientemente como para erradicar los interferentes o posibles modificaciones.

La aplicación de un algoritmo ayuda a atenuar la heterogeneidad de los sensores al identificar la concentración del analito de interés mediante la alimentación de información experimental. Esta

información es analizada con métodos probabilísticos (ajustes lineales, curvas de calibración, etc.) utilizados comúnmente en los sensores. Se deben tomar en cuenta las bandas de confianza y evitar la mayor pérdida de información, ya sea experimental o por toma de decisiones del algoritmo.

De acuerdo con lo observado en el diseño, la evaluación de los sensores utilizando RFD se podrían evaluar de forma rápida siempre y cuando se tengan repeticiones experimentales suficientes para alimentar apropiadamente el algoritmo. Este algoritmo presenta variabilidades en su evolución, como la probabilidad de las gotas de caer en cierto camino que se toma de forma inicial y deshabilita la posibilidad de una exploración más profunda de los posibles caminos, si bien la rápida convergencia en la solución es algo de interés, pierde el impacto al no promover una búsqueda de una solución “óptima”

4. Conclusiones

Existen diferentes algoritmos de ML que pueden utilizarse en el proceso de determinación electroquímica de analitos en una solución. El desarrollo de sensores electroquímicos acoplados a un circuito electrónico para su procesamiento aún se encuentra limitado, sin embargo, gracias a los avances, se han establecido patrones que fácilmente se pueden asociar a sensores específicos.

El conocimiento profundo de los fenómenos electroquímicos generados en los sensores, así como las condiciones experimentales deseadas y los resultados de estas proveen información suficiente para que un algoritmo de ML pueda determinar acertadamente la concentración del analito.

Así mismo esta complementación entre la electroquímica, la electrónica y los algoritmos de IA proponen una opción atractiva al tener la capacidad de discernir información como

interferentes que posteriormente podrían ser de interés para el ámbito de cuidado médico.

Se espera el desarrollo de la parte experimental que alimente al algoritmo que, una vez desarrollado, obtenga respuestas confiables y pudiera implementarse apropiadamente en un multisensor portátil.

Referencias

- [1] A. Mena-Bravo and M. D. Luque de Castro, “Sweat: A sample with limited present applications and promising future in metabolomics,” *J Pharm Biomed Anal*, vol. 90, pp. 139–147, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.jpba.2013.10.048.
- [2] S. R. Corrie, J. W. Coffey, J. Islam, K. A. Markey, and M. A. F. Kendall, “Blood, sweat, and tears: developing clinically relevant protein biosensors for integrated body fluid analysis,” *Analyst*, vol. 140, no. 13, pp. 4350–4364, 2015, doi: 10.1039/C5AN00464K.
- [3] H. Murota *et al.*, “Sweat, the driving force behind normal skin: An emerging perspective on functional biology and regulatory mechanisms,” *J Dermatol Sci*, vol. 77, no. 1, pp. 3–10, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jdermsci.2014.08.011.
- [4] W. Duan, J. Cheng, and J. Guo, “Smartphone-based photochemical sensor for multiplex determination of glucose, uric acid, and total cholesterol in fingertip blood,” *Analyst*, vol. 147, no. 14, pp. 3285–3290, 2022, doi: 10.1039/D2AN00764A.
- [5] S. A. Shahamirifard, M. Ghaedi, Z. Razmi, and S. Hajati, “A simple ultrasensitive electrochemical sensor for simultaneous determination of gallic acid and uric acid in human urine and fruit juices based on zirconia-choline chloride-gold nanoparticles-modified carbon paste electrode,” *Biosens Bioelectron*, vol. 114, pp. 30–36, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.bios.2018.05.009.
- [6] N. Mishra, P. Dwivedi, and R. Trivedi, “Non-invasive portable uric acid sensor for biomedical and healthcare application,” *Mater Today Proc*, vol. 80, pp. 1862–1864, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.626.
- [7] “Cystic fibrosis,” *Nat Rev Dis Primers*, vol. 1, no. 1, p. 15049, May 2015, doi: 10.1038/nrdp.2015.49.
- [8] T. Sancho Bueso and J. García Puig, “Criterios terapéuticos ante la hiperuricemia,” *Rev Clin Esp*, vol. 201, no. 2, pp. 85–87, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0014-2565(01)70756-4.
- [9] Z. Li *et al.*, “A Dual-Function Wearable Electrochemical Sensor for Uric Acid and Glucose Sensing in Sweat,” *Biosensors (Basel)*, vol. 13, no. 1, p. 105, Jan. 2023, doi: 10.3390/bios13010105.
- [10] J. Gonzalo-Ruiz *et al.*, “Early determination of cystic fibrosis by electrochemical chloride quantification in sweat,” *Biosens Bioelectron*, vol. 24, no. 6, pp. 1788–1791, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.bios.2008.07.051.
- [11] M. Parrilla, A. Vanhooydonck, R. Watts, and K. De Wael, “Wearable wristband-based electrochemical sensor for the detection of phenylalanine in biofluids,”

- Biosens Bioelectron*, vol. 197, p. 113764, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.bios.2021.113764.
- [12] W. Putzbach and N. Ronkainen, "Immobilization Techniques in the Fabrication of Nanomaterial-Based Electrochemical Biosensors: A Review," *Sensors*, vol. 13, no. 4, pp. 4811–4840, Apr. 2013, doi: 10.3390/s130404811.
- [13] M. F. S. Teixeira, B. H. Freitas, P. M. Seraphim, L. O. Salmazo, M. A. Nobre, and S. Lanfredi, "Development of an electrochemical sensor for potassium ions based on K₂Sr₂Nb₅O₁₅ modified electrode," *Procedia Chem*, vol. 1, no. 1, pp. 293–296, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.proche.2009.07.073.
- [14] E. Zdrachek and E. Bakker, "Potentiometric Sensing," *Anal Chem*, vol. 91, no. 1, pp. 2–26, Jan. 2019, doi: 10.1021/acs.analchem.8b04681.
- [15] D. Ma, S. S. Ghoreishizadeh, and P. Georgiou, "Concurrent Potentiometric and Amperometric Sensing With Shared Reference Electrodes," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 5, pp. 5720–5727, Mar. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3039567.
- [16] C. D. Ruiz-Guerrero *et al.*, "Novel cobalt-based aerogels for uric acid detection in fluids at physiological pH," *Biosens Bioelectron*, p. 116850, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.bios.2024.116850.
- [17] D. V. Estrada-Osorio, R. A. Escalona-Villalpando, A. Gutiérrez, L. G. Arriaga, and J. Ledesma-García, "Poly-L-lysine-modified with ferrocene to obtain a redox polymer for mediated glucose biosensor application," *Bioelectrochemistry*, vol. 146, p. 108147, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.bioelechem.2022.108147.
- [18] C. Dincer *et al.*, "Disposable Sensors in Diagnostics, Food, and Environmental Monitoring," *Advanced Materials*, vol. 31, no. 30, Jul. 2019, doi: 10.1002/adma.201806739.
- [19] H. S. Stein *et al.*, "From materials discovery to system optimization by integrating combinatorial electrochemistry and data science," *Curr Opin Electrochem*, vol. 35, p. 101053, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.coelec.2022.101053.
- [20] J. N. Kok, E. J. W. Boers, W. A. Kusters, and P. van der Putten, *Artificial Intelligence: Definition, trends, techniques and cases*. ISBN-978-1-84826-575-2, 2009.
- [21] J. M. Helm *et al.*, "Machine Learning and Artificial Intelligence: Definitions, Applications, and Future Directions," *Curr Rev Musculoskelet Med*, vol. 13, no. 1, pp. 69–76, Feb. 2020, doi: 10.1007/s12178-020-09600-8.
- [22] P. Kissinger and W. R. Heineman, *Laboratory Techniques in electroanalytical Chemistry*, 2nd ed. ISBN 0824794451, 9780824794453, 1996.
- [23] A. Malviya and P. P. Solanki, "Photogalvanics: A sustainable and promising device for solar energy conversion and storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 662–691, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.295.
- [24] I. T. Jolliffe and J. Cadima, "Principal component analysis: a review and recent developments," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2065, p. 20150202, Apr. 2016, doi: 10.1098/rsta.2015.0202.
- [25] Y. Yoon, M. J. Kim, and J. J. Kim, "Machine learning to electrochemistry: Analysis of polymers and halide ions in a copper electrolyte," *Electrochim Acta*, vol. 399, p. 139424, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.electacta.2021.139424.
- [26] H. Chen, E. Kätelhön, and R. G. Compton, "Machine learning in fundamental electrochemistry: Recent advances and future opportunities," *Curr Opin Electrochem*, vol. 38, p. 101214, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.coelec.2023.101214.
- [27] V. A. T. Dam, M. A. G. Zevenbergen, and R. van Schaijk, "Toward wearable patch for sweat analysis," *Sens Actuators B Chem*, vol. 236, pp. 834–838, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.snb.2016.01.143.
- [28] F. Gao *et al.*, "Wearable and flexible electrochemical sensors for sweat analysis: a review", doi: 10.1038/s41378-022-00443-6.
- [29] H. Y. Y. Nyein *et al.*, "A wearable patch for continuous analysis of thermoregulatory sweat at rest," *Nat Commun*, vol. 12, no. 1, p. 1823, Mar. 2021, doi: 10.1038/s41467-021-22109-z.
- [30] D.-H. Choi *et al.*, "Sweat test for cystic fibrosis: Wearable sweat sensor vs. standard laboratory test," *Journal of Cystic Fibrosis*, vol. 17, no. 4, pp. e35–e38, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jcf.2018.03.005.
- [31] V. A. T. Dam, M. A. G. Zevenbergen, and R. van Schaijk, "Flexible Chloride Sensor for Sweat Analysis," *Procedia Eng*, vol. 120, pp. 237–240, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.588.
- [32] C. J. Harvey, R. F. LeBouf, and A. B. Stefaniak, "Formulation and stability of a novel artificial human sweat under conditions of storage and use," *Toxicology in Vitro*, vol. 24, no. 6, pp. 1790–1796, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.tiv.2010.06.016.
- [33] E. Kätelhön, A. Feng, W. Cheng, S. Eloul, C. Batchelor-McAuley, and R. G. Compton, "Understanding Nano-Impact Current Spikes: Electrochemical Doping of Impacting Nanoparticles," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 120, no. 30, pp. 17029–17034, Aug. 2016, doi: 10.1021/acs.jpcc.6b04289.
- [34] A. Cranny, N. R. Harris, M. Nie, J. A. Wharton, R. J. K. Wood, and K. R. Stokes, "Screen-printed potentiometric Ag/AgCl chloride sensors: Lifetime performance and their use in soil salt measurements," *Sens Actuators A Phys*, vol. 169, no. 2, pp. 288–294, Oct. 2011, doi: 10.1016/J.SNA.2011.01.016.
- [35] P. Puthongkham, S. Wirojsaengthong, and A. Suea-Ngam, "Machine learning and chemometrics for electrochemical sensors: moving forward to the future of analytical chemistry," 2021, doi: 10.1039/d1an01148k.
- [36] P. Rabanal, I. Rodríguez, and F. Rubio, "Solving Dynamic TSP by Using River Formation Dynamics," in *2008 Fourth International Conference on Natural Computation*, IEEE, 2008, pp. 246–250. doi: 10.1109/ICNC.2008.760.

Influencia de Parámetros de Síntesis en la Dimensionalidad de la Sílice Mesoporosa SBA-15

Influence of Synthesis Parameters on the Dimensionality of Mesoporous Silica SBA-15

Sánchez Ramírez Ed Fabián^{1*}, Cuán Hernández María de los Ángeles¹, Nava Mendoza Rufino¹
López Marín Luz M.², Díaz Díaz Rodrigo¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Querétaro, México

²Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Querétaro, México
edfabian.s.r@gmail.com*

Palabras clave: NAN. Sílice mesoporosa SBA-15. Acidez. Control morfológico. Control de tamaño. Método de síntesis.

Resumen- El objetivo de este estudio es establecer los parámetros de síntesis para obtener partículas de SBA-15 de dimensiones iguales o inferiores a 350 nm x 500 nm, con el fin de usarlas como transportadores de fármacos. La síntesis se realizó mediante hidrólisis y condensación de Tetraetil ortosilicato (TEOS) en un medio ácido sobre Pluronic P123, siguiendo un método del grupo de investigación. Se analizaron tres parámetros: el pH, el uso de agitación continua o reposo, y la relación molar TEOS/P123, todos evaluados en intervalos definidos por la literatura. Se obtuvieron dos tipos de partículas de SBA-15 con diferentes longitudes y morfologías: una primera, de 808 nm, con estructura torcida y aglomerada, y otra de 560 nm, con estructura recta y menos aglomerada. Las variaciones se explican por el efecto del HCl en la catálisis ácida de TEOS, la agitación que favorece colisiones y agregación, y una alta relación TEOS/P123 que produce oligómeros de silicato grandes, los cuales interactúan con las micelas de óxido de etileno, aumentando la carga superficial y repulsión entre partículas, reduciendo la longitud de las partículas SBA-15.

Keywords: NAN. Mesoporous Silica SBA-15. Acidity. Morphological control. Size control. Synthesis method.

Abstract- The goal of this study is to determine synthesis parameters to obtain SBA-15 particles with dimensions of 350 nm x 500 nm or smaller for potential drug delivery applications. The synthesis involved tetraethyl orthosilicate (TEOS) hydrolysis and condensation on Pluronic P123 in an acidic medium, based on a methodology previously established by the research group. Three parameters were investigated for their impact on SBA-15 size: pH, reaction stirring versus resting, and the TEOS/Pluronic P123 molar ratio, each evaluated within literature-specified ranges. Two types of SBA-15 particles with distinct lengths and morphologies were obtained: one at 808 nm (measured by dynamic light scattering) with a twisted, agglomerated structure, and another at 560 nm with a straight, less agglomerated structure. Differences were attributed to HCl concentration affecting the acidic catalytic role in TEOS reactions; continuous stirring increasing particle collision and aggregation; and a higher TEOS/P123 molar ratio producing larger silicate oligomers that adhere to ethylene oxide micelles, raising surface charge and repulsion, thus reducing SBA-15 rod length.

1. Introducción

El tratamiento de enfermedades mediante administración de moléculas de fármaco libres presenta, dentro del torrente sanguíneo,

limitada eficacia debido a baja solubilidad, poca estabilidad, toxicidad indeseada o dificultad para cruzar la membrana celular. [1]

Una de las maneras de abordar estas limitantes y poder aplicar de manera eficiente medicamentos a células enfermas se basa en imitar sistemas naturales utilizados para el transporte de moléculas entre células. Esto se incluye en la definición de biomimetismo (del término “biomimetism” en lengua inglesa), referente a la creación de estructuras artificiales que imitan características de modelos y sistemas existentes en la naturaleza. Esta imitación abarca procesos biológicos desde la macro hasta la nano escala. [2]

De los materiales biomiméticos que han demostrado ser aptos para el fin mencionado, son las denominadas protocélulas, las cuales consisten en una nanopartícula o material nanoestructurado (capaz de adsorber fármacos en su superficie) recubierto de una membrana lipídica, de manera que imita la superficie de las membranas citoplasmáticas de las células (la composición de la membrana lipídica dependerá del tipo de célula que se quiera imitar) [3-4]. De esta manera, las protocélulas evitan ser detectadas como un cuerpo extraño por el sistema inmunológico del cuerpo, lo que les brinda, dentro del torrente sanguíneo, una circulación más eficiente, menor toxicidad, capacidad de direccionamiento específico, y mayor acumulación de fármaco en sitios tumorales o de inflamación. [5-6]

Entre los materiales nanoestructurados propuestos para la formación de protocélulas destacan los materiales mesoporosos de sílice. Estos han demostrado ser plataformas altamente adecuadas y versátiles, gracias a su capacidad para albergar una variedad de moléculas en sus poros (que van de 2 a más de 20 nm en diámetro). Esta estructura proporciona una alta área superficial interna ($>1000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) [7-9]; lo cual facilita una gran capacidad de carga y reactividad. Además, el método de síntesis de estos materiales permite controlar el tamaño, la forma y las propiedades de los mesoporos y su superficie, adaptándolos

a diversas aplicaciones bioquímicas y biomédicas. [10-11]

Entre los materiales mesoporosos de sílice, la SBA-15 (Santa Barbara Amorphous-15, en Inglés) se presenta como candidata ideal para la creación de protocélulas con la finalidad de que puedan ser internalizadas por las células. Su morfología de bastoncillo facilita la internalización celular a través de diversos mecanismos, a diferencia de las partículas esféricas, que suelen limitarse a un solo mecanismo de entrada. Esta versatilidad se debe a la interacción multivalente de adhesión que promueve la SBA-15. [12] Además, la posibilidad de ajustar su tamaño permite aprovechar la tendencia de muchas células a internalizar partículas de tamaños menores a 500 nm.[13-15].

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo es sintetizar sílice mesoporosa SBA-15 con dimensiones de 350 nm x 500 nm o menores. Para lograrlo, se realizaron modificaciones en los parámetros de síntesis previamente trabajados por el grupo de investigación [16-17], tales como la concentración del catalizador ácido [18], agitación o estado estático durante la reacción del TEOS [19], y la relación molar TEOS/Pluronic P123 [20]. Estas variaciones nos permitieron ajustar las características estructurales del material, optimizando así su morfología y tamaño.

2. Materiales y métodos

Los materiales mesoporosos son usualmente sintetizados a través del uso de copolímeros de tribloque anfifílicos que sirven para dirigir la organización de especies polimerizantes de sílice, de manera que se obtienen mesoporos ordenados hexagonalmente. Para el caso de SBA-15, se utiliza el surfactante no iónico P123 disuelto en medio acuoso ácido. Sobre esta plantilla de surfactante de micelas

autoensambladas, se lleva a cabo la polimerización de Tetraetil ortosilicato. [21]

2.1 Materiales

Los reactivos utilizados para esta síntesis son: Pluronic 123 y Tetraetil ortosilicato adquirido de Aldrich. Ácido Clorhídrico al 37.10 % de J.T.Baker. Agua Desionizada.

2.2 Síntesis de SBA-15

Se disolvió Pluronic P123 en 30 ml de agua y 120 ml de HCl en un vaso de precipitados. La mezcla se agitó a 35 °C hasta la disolución del P123. Posteriormente, se agregó TEOS gota a gota. Una de estas muestras se dejó en agitación continua y otra en estado estático después de haberse agregado el TEOS, durante 24 horas a 35°C. Después, las muestras se sometieron a maduración por 24 horas a 70 °C en mufla. El precipitado resultante se lavó con agua desionizada y se dejó secar. Las muestras se calcinaron a 500 °C por cinco horas. En la Tabla 1 se resumen las variables de síntesis empleadas para las dos muestras trabajadas, denominadas Muestra 1 y Muestra 2.

Tabla 1

Número de muestra	Concentración de ácido HCl [Molaridad]	Agitación durante la reacción	Relación molar TEOS/P123
1	4M	Si	42.49
2	2M	No	58.68

Para este trabajo, se escogieron estos valores, sin pruebas de modificación de una sola variable a la vez, debido a que en [18], 4 M produce las partículas de mayor longitud, y 2 M es el límite para producir partículas de menor longitud; en [19], la agitación incrementa las dimensiones de las partículas, mientras que la reacción estática reduce su tamaño, y en [20], la relación molar TEOS/Pluronic P123 de 58.68 produce la SBA-15 de menor longitud, comparándola con la relación 42.49 utilizadas en [16-17].

2.3 Técnicas de Caracterización

Para conocer el tamaño promedio de las partículas obtenidas de las síntesis realizadas, y comprobar el efecto de las variables trabajadas sobre las dimensiones de la SBA-15, se recurre a una técnica de Dispersión dinámica de luz (DLS por sus siglas en inglés “Dynamic Light Scattering”), la cual permite obtener de manera rápida una distribución de tamaño de partículas aproximada.

Para observar la morfología de bastoncillo de la SBA-15, y determinar si esta partícula se tuerce o se aglomera, se utiliza la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido, la cual permite obtener imágenes detalladas de su topografía y composición.

2.3.1 Distribución de tamaño por dispersión dinámica de luz

Esta técnica se basa en la medición del movimiento de partículas en suspensión debido a su movimiento browniano, que es el movimiento aleatorio que experimentan las partículas cuando están suspendidas en un fluido. La muestra es iluminada por un láser y la luz dispersada por las partículas se detecta en un ángulo específico. El ángulo detectado al que se dispersa este haz proporciona información del tamaño de partícula. [22] Esta técnica requiere soluciones acuosas de concentración 0.005 porcentaje en peso; parámetro de índice de refracción $n=1.54$ del

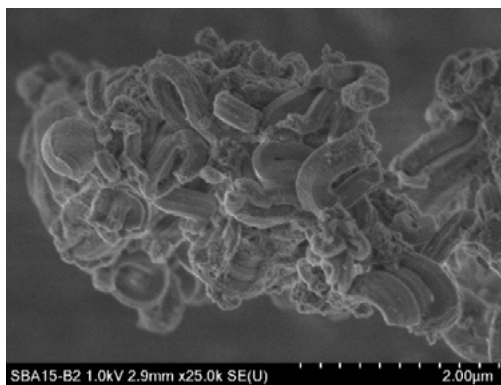


Fig. 1. Partículas de SBA-15 correspondientes a la Muestra 1.

óxido de silicio, y constante dieléctrica del agua de 80.1 [22]. El instrumento utilizado fue un Zetasizer Ultra, de la marca Malvern Panalytical, con el método Multi-Angle Dynamic Light Scattering (MADLS).

2.3.2 Microscopía electrónica de barrido

Esta técnica utiliza un haz de electrones para escanear la superficie de una muestra y obtener imágenes detalladas de su topografía y composición. La morfología de las muestras se analizó mediante un microscopio electrónico de barrido modelo SU8230 de la marca Hitachi a 1.0 kV. La muestra fue soportada en una cinta de cobre conductora.

3. Resultados

3.1 Morfología

El análisis de la morfología y la topología de los productos de la síntesis para obtener la SBA-15 en diferentes tallas fue realizado utilizando la microscopía electrónica de barrido y se discute a continuación. En la Fig.1 se observa a la muestra 1 de la SBA-15, la cual consiste en partículas en forma de bastoncillos torcidos y aglomerados.

Individualmente, estas partículas presentan longitud máxima, considerando desde los extremos opuestos más alejados de 921 nm, y un ancho entre 245 y 156 nm, como se puede analizar de la Muestra 1, Fig. 2. Para la Muestra 2, la cual se muestra en la Fig. 3, se observa una perspectiva transversal que permite discernir una partícula de menor tamaño, y su estructura porosa tubular de forma hexagonal y de menor talla con respecto a la Muestra 1.

3.2 Distribución de tamaño

En la Fig. 4 se presentan las distribuciones de tamaños de ambas muestras. La Muestra 1 presenta un tamaño promedio de partícula de 808 nm. La Muestra 2 presenta en promedio 568 nm.

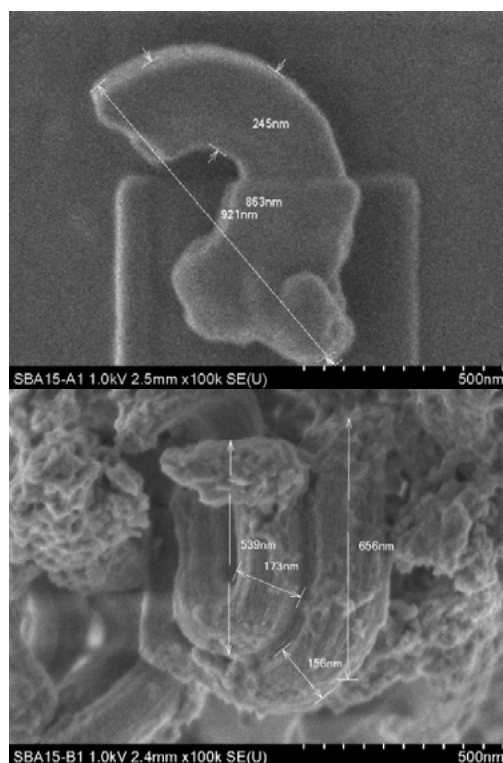


Fig. 2. Medición de partículas de SBA-15 de la Muestra 1.

El ancho de las bandas presentadas en la distribución del tamaño indica que en la muestra uno hay más variedad como se observa en la micrografía de la Fig.1. Mientras que la muestra 2 hay una distribución más homogénea en los tamaños de las partículas, lo cual indica que ese procedimiento es más adecuado a lo que se persigue en este trabajo.

A continuación, se discute la influencia de los parámetros variados en las muestras.

3.3 Área superficial y volumen de poro

El grupo de trabajo analizó propiedades estructurales (áreas superficiales, diámetro promedio de poro y volumen de poro) de SBA-15 en [16-17]. Debido a que el método de síntesis empleado aquí se basa en aquellos utilizados en estas dos investigaciones, se asegura que las partículas obtenidas presentan altas áreas superficiales, diámetros de poro en el rango mesoporoso, y alto volumen de poro.

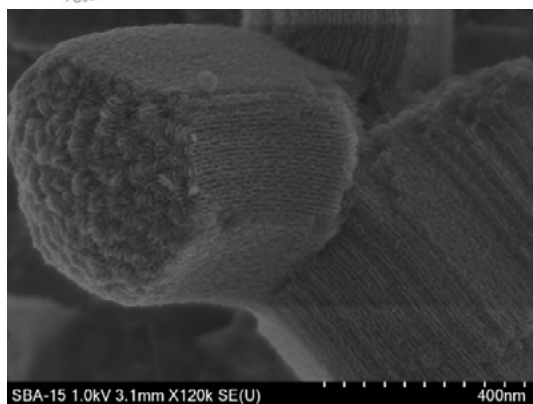


Fig. 3. Partículas de SBA-15 correspondientes a la Muestra 2.

Lo anterior también se fundamenta en la similitud morfológica observada en las micrografías con aquellas de los trabajos mencionados.

4. Discusión

4.1 Influencia del pH

En [18] se argumenta que la morfología de los materiales mesoporosos está influenciada por la competición entre la energía libre de auto-ensamble de la mesoestructura y la energía libre superficial del coloide, así como una fuerza cortante (interpretada como la agitación). La dependencia del cambio en el tamaño de partícula con respecto al HCl se puede atribuir a la función catalítica del ácido para el TEOS, es decir, la velocidad de hidrólisis es comparativamente mayor que la velocidad de condensación.

De acuerdo con el mecanismo de separación de fase coloidal propuesto en [23], la separación de fase (cuando se observa el primer precipitado en solución) ocurre más pronta con un periodo corto de inducción (intervalo de tiempo desde la adición del TEOS hasta la separación de fase) bajo concentraciones altas de acidez, lo que favorece la morfología de bastoncillos cortos. La disminución de acidez (<1.5 M) incrementa el tiempo de inducción, lo que resulta en morfologías con curvatura pronunciada.

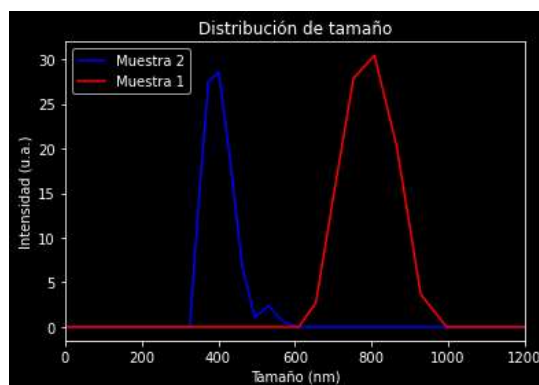


Fig. 4. Distribución de tamaño de partícula.

Sin embargo, estos mismos autores reportan resultados insatisfactorios a concentraciones de acidez más altas: a 4.0 M, las partículas se deforman al aumentar su longitud y espesor; a 5.0 M las partículas se deforman hasta convertirse en esferas, efecto similar a lo observado a una concentración de 4.0 M.

4.2 Efecto de la agitación

En [24] se explica que, de acuerdo con el modelo de ensamble de bastoncillos de sílice, el compuesto orgánico-inorgánico se forma alrededor de los bastoncillos micelares después de la adición de TEOS. Los compósitos en forma de bastoncillo aislados se agregan para formar la SBA-15, resultado del auto ensamblado y de las colisiones provocadas por la agitación. Una velocidad de agitación mayor provee una fuerza de colisión mayor, lo que conlleva al ensamblado de más bastoncillos.

Relacionado a este concepto, en [25] se concluye que si durante el periodo de reacción, después de agregar TEOS a la solución ácida de copolímero surfactante, se deja estática, se obtienen estructuras discretas en forma de bastoncillos (rod-like); por otra parte, cuando la reacción se lleva a cabo con agitación constante durante el periodo de reacción, se obtiene una sílice en forma de fibras, resultado de aglomerados de bastoncillos. Lo anterior coincide con el argumento hecho previamente de que la agitación contribuye a originar un

mayor número de colisiones durante todo el periodo de reacción, promoviendo la aglomeración de las partículas.

4.3 Efecto de la Relación molar TEOS/Pluronic P123

En [26] se exploran variaciones de relaciones molares entre TEOS y Pluronic P123 (TEOS/P123). En breve, los autores reportan una fuerte influencia en tamaño y morfología de las partículas obtenidas: TEOS/P123=48 generan ramos de fibras alineadas de 50 -75 nm; TEOS/P123=60 produce columnas uniformes mesoporosas con su arreglo de poros bien definidos; TEOS/P123=77 resulta en grandes cantidades de rebanadas de forma hexagonal, de dimensión en el plano (100) de una micra; TEOS/P123=110 genera grandes cantidades de películas. Los autores explican que el incremento de la relación molar TEOS/P123 promueve oligómeros de silicato más grandes que se adhieren a los cepillos de óxido de etileno de las micelas de P123, incrementando la carga superficial y repulsión entre éstas, disminuyendo la longitud de los bastoncillos resultantes.

La relación molar empleada en la Muestra 2, de 58.68, que se apega más a la relación TEOS/P123=60, produce partículas más uniformes y menos torcidas (Fig. 3), así como de menor tamaño (como se aprecia en la distribución de tamaño estrecha en la Fig. 4).

3. Conclusiones

La modificación de los parámetros de concentración de ácido, agitación durante la reacción, y la relación molar TEOS/Pluronic P123 generan dos partículas de SBA-15 de longitudes y morfologías diferentes, lográndose una reducción considerable de tamaño, con base en las mediciones de tamaño de dispersión de luz dinámica, de 808 nm a 560 nm, así como reducción en la torción y aglomeración de los bastoncillos, al comparar

las micrografías de la Muestra 1 y la Muestra 2. Los dos extremos de condiciones utilizados en esta investigación proporcionan un panorama de trabajo futuro en el que se puede explorar, mediante el desarrollo de un diseño de experimentos más amplio, cuáles valores dentro de estos rangos generarán partículas menores a 500 nm en longitud y de menor aglomeración.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) a través del proyecto 53395, y por la beca otorgada a Ed Fabián Sánchez Ramírez (CVU 1237749) para estudios de maestría; a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, a través del proyecto IT200421; al laboratorio Nacional de caracterización de materiales del C.F.A.T.A (UNAM), por la realizar los análisis de espectroscopia de SEM.

Referencias

- [1] J. W. Yoo, D. J. Irvine, D. E. Discher, and S. Mitragotri, "Bio-inspired, bioengineered and biomimetic drug delivery carriers," Jul. 2011. doi: 10.1038/nrd3499.
- [2] K. G. Gareev *et al.*, "Biomimetic Nanomaterials: Diversity, Technology, and Biomedical Applications," Jul. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/nano12142485.
- [3] H. Meng *et al.*, "Use of a lipid-coated mesoporous silica nanoparticle platform for synergistic gemcitabine and paclitaxel delivery to human pancreatic cancer in mice," *ACS Nano*, vol. 9, no. 4, pp. 3540–3557, Apr. 2015, doi: 10.1021/acs.nano.5b00510.
- [4] M. Sushnitha, M. Evangelopoulos, E. Tasciotti, and F. Taraballi, "Cell Membrane-Based Biomimetic Nanoparticles and the Immune System: Immunomodulatory Interactions to Therapeutic Applications," Jun. 17, 2020,

- [5] Y. Liao, Y. Zhang, N. T. Blum, J. Lin, and P. Huang, "Biomimetic hybrid membrane-based nanoplatfoms: Synthesis, properties and biomedical applications," Sep. 01, 2020, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d0nh00267d.
- [6] J. Shi, P. W. Kantoff, R. Wooster, and O. C. Farokhzad, "Cancer nanomedicine: Progress, challenges and opportunities," Jan. 01, 2017, *Nature Publishing Group*. doi: 10.1038/nrc.2016.108.
- [7] T. M. Albayati, I. K. Salih, and H. F. Alazzawi, "Synthesis and characterization of a modified surface of SBA-15 mesoporous silica for a chloramphenicol drug delivery system," *Heliyon*, vol. 5, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02539.
- [8] A. E. LaBauve *et al.*, "Lipid-coated mesoporous silica nanoparticles for anti-viral applications via delivery of CRISPR-Cas9 ribonucleoproteins," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-33092-4.
- [9] A. Nouredine *et al.*, "Engineering of monosized lipid-coated mesoporous silica nanoparticles for CRISPR delivery," *Acta Biomater*, vol. 114, pp. 358–368, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.actbio.2020.07.027.
- [10] K. S. Butler, P. N. Durfee, C. Theron, C. E. Ashley, E. C. Carnes, and C. J. Brinker, "Protocells: Modular Mesoporous Silica Nanoparticle-Supported Lipid Bilayers for Drug Delivery," *Small*, vol. 12, no. 16, pp. 2173–2185, Apr. 2016, doi: 10.1002/sml.201502119.
- [11] L. Xiong, X. Du, B. Shi, J. Bi, F. Kleitz, and S. Z. Qiao, "Tunable stellate mesoporous silica nanoparticles for intracellular drug delivery," *J Mater Chem B*, vol. 3, no. 8, pp. 1712–1721, Feb. 2015, doi: 10.1039/c4tb01601g.
- [12] S. Mazumdar, D. Chitkara, and A. Mittal, "Exploration and insights into the cellular internalization and intracellular fate of amphiphilic polymeric nanocarriers," Apr. 01, 2021, *Chinese Academy of Medical Sciences*. doi: 10.1016/j.apsb.2021.02.019.
- [13] J. Rejman, V. Oberle, I. S. Zuhorn, and D. Hoekstra, "Size-dependent internalization of particles via the pathways of clathrin-and caveolae-mediated endocytosis," 2004.
- [14] E. Acosta, "Bioavailability of nanoparticles in nutrient and nutraceutical delivery," Feb. 2009. doi: 10.1016/j.cocis.2008.01.002.
- [15] K. C. Murugan Yahya Choonara Pradeep Kumar Divya Bijukumar Lisa du Toit viness Pillay, "Parameters and characteristics governing cellular internalization and trans-barrier trafficking of nanostructures," *International Journal of Nanomedicine Dovepress*, vol. 10, pp. 2191–2206, 2015, doi: 10.2147/IJN.S75615.
- [16] A. Moreno-Martell *et al.*, "CO oxidation at 20 °C on Au catalysts supported on mesoporous silica: Effects of support structural properties and modifiers," *Materials*, vol. 11, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.3390/ma11060948.
- [17] V. Hernández-Morales, R. Nava, Y. J. Acosta-Silva, S. A. Macías-Sánchez, J. J. Pérez-Bueno, and B. Pawelec, "Adsorption of lead (II) on SBA-15 mesoporous molecular sieve functionalized with -NH₂ groups," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 160, pp. 133–142, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.micromeso.2012.05.004.
- [18] S. Kang, Y. B. Chae, and J. S. Yu, "HCl as a key parameter in size-tunable synthesis of sba-15 silica with rodlike morphology," *J Nanosci Nanotechnol*, vol. 9, no. 1, pp. 527–532, Jan. 2009, doi: 10.1166/jnn.2009.J024.
- [19] Q. Wang *et al.*, "Size control of SBA-15 by tuning the stirring speed for the formation of CMK-3 with distinct adsorption performance," *Nano Res*, vol. 9, no. 8, pp. 2294–2302, Aug. 2016, doi: 10.1007/s12274-016-1116-8.
- [20] K. Zhuang *et al.*, "Growth process and morphology control of SBA-15 particles: Synergistic effects of tetraethoxysilane and Pluronic-123 concentrations," *MRS Commun*, vol. 6, no. 4, pp. 449–454, Dec. 2016, doi: 10.1557/mrc.2016.56.
- [21] D. Zhao *et al.*, "Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores," *Science (1979)*, vol. 279, no. 5350, pp. 548–552, Jan. 1998, doi: 10.1126/science.279.5350.548.
- [22] J. Austin, C. Minelli, D. Hamilton, M. Wywijas, and H. J. Jones, "Nanoparticle number concentration measurements by multi-

- angle dynamic light scattering,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 22, no. 5, May 2020, doi: 10.1007/s11051-020-04840-8.
- [23] C. Yu, J. Fan, B. Tian, and D. Zhao, “Morphology Development of Mesoporous Materials: A Colloidal Phase Separation Mechanism,” *Chemistry of Materials*, vol. 16, no. 5, pp. 889–898, Mar. 2004, doi: 10.1021/cm035011g.
- [24] Q. Wang *et al.*, “Size control of SBA-15 by tuning the stirring speed for the formation of CMK-3 with distinct adsorption performance,” *Nano Res*, vol. 9, no. 8, pp. 2294–2302, Aug. 2016, doi: 10.1007/s12274-016-1116-8.
- [25] K. Kosuge, T. Sato, N. Kikukawa, and M. Takemori, “Morphological Control of Rod- and Fiberlike SBA-15 Type Mesoporous Silica Using Water-Soluble Sodium Silicate,” *Chemistry of Materials*, vol. 16, no. 5, pp. 899–905, Mar. 2004, doi: 10.1021/cm030622u.
- [26] H. Zhang, J. Sun, D. Ma, G. Weinberg, D. S. Su, and X. Bao, “Engineered complex emulsion system: Toward modulating the pore length and morphological architecture of mesoporous silicas,” *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 110, no. 51, pp. 25908–25915, Dec. 2006, doi: 10.1021/jp065760w.

Feature generation with genetic algorithms for imagined speech EEG signal classification

Lara, Edgar* • Rodríguez, Juvenal* • Tovar, Saúl* • Takacs, Andras*

**Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.*

Santiago de Querétaro 76010, México

Corresponding author email: elara28@alumnos.uaq.mx

Keywords: IAR, EEG, feature extraction, genetic algorithm, classification, optimization.

Abstract- This work presents a method for classifying EEG (Electroencephalogram) signals generated when a person concentrates on specific words, defined as “Imagined Speech.” EEG measures the electrical activity of the brain. EEG signal classification is difficult as the machine learning (ML) algorithm has to learn how to categorize the signal linked to the imagined word. A novel method is proposed to generate a specific feature vector to achieve classification with superior accuracy results to those found in the state of the art. The method leverages a genetic algorithm to create an optimal feature combination for the classification task and machine learning model. This algorithm is particularly useful in this context as it can efficiently explore a large feature space and identify the most relevant features for the task.

1. Introduction

Processing imagined speech is important because it helps us understand how the brain generates and controls inner thoughts, supports communication skills, and aids in developing brain-computer interfaces.

This task is difficult due to several interrelated factors: it demands significant cognitive resources, leading to potential overload; distractions from other thoughts can disrupt it; incorporating sensory experiences adds unnecessary noise; the lack of auditory and vocal feedback makes it hard to gauge coherence; coordinating various brain regions complicates the process; and individual differences in the vividness of inner speech further influence the ease of imagining speech. These elements create a challenging and often noisy cognitive environment for processing inner dialogue.

Due to the high complexity of EEG signals in imagined speech, classification is difficult. For this reason, signal databases are composed of simple, imagined vocal structures. Authors of [1], [2] and [3] used a database with five vowels (a,e,i,o,u) in English, reporting a

classification accuracy of 35.7%, 87% and 79.7%, respectively.

The work of [4] proposes four words, two of which are in English (Yes, No) and two in Hindi (Haan, Na), and reports 73.4%.

The dataset in [5] uses two English words (Yes, No), they achieved an accuracy of 63.16%.

The simpler the words are, the easier it is for the classifier model to classify them and, therefore, the greater their precision. Otherwise, the more complex the words, the more difficult the task and, therefore, the lower the precision.

Within the state-of-the-art, we observe a variety of features being used. For instance, [2] utilizes 5 features (mean, variance, standard deviation, skewness), [3] employs 32 features, and [6] uses 44 features.

It is necessary to characterize the signals to have information about them, using the “Feature Extraction” technique. A signal changes when thinking about one word or another, however, these changes cannot be identified directly. Furthermore, depending on the nature of the signals and the classifier

algorithm, the characteristics are different, so there is not a standard of the type and quantity of features to extract. Traditional methods are based on digital signal processing. [5] using Artificial Neural Networks (ANN) or [7], where the Authors use Deep Neural Networks to analyse the features extracted from the signal.

This selection, given that it is a fairly large number, can be optimized through Genetic Algorithms (GA) as proposed [8], which as a signal processing method uses genetic algorithms for feature extraction. Another work is [9] where he uses GA for optimal classification of epileptic seizures in EEG using wavelet analysis. Additional work is [10] where they applied EEG electrode selection for person identification through a genetic algorithm.

Once the selection of features has been optimized, a classifier model is used. Among the classical Machine Learning (ML) models used in similar works we find that [11] used Support Vector Machines (SVM), in [12] the authors applied Naive Bayes and in [13] the results were calculated with Random Forest.

Other authors applied Deep Learning (DL) techniques. While [5] has used Recurrent Neural Networks (RNN). [1] using Convolutional Neural Network (CNN) in conjunction with Transfer Learning (TL) and finally, in [14] they used a combination of CNN+RNN.

The present work was inspired by [6], which proposes a processing technique with 44 statistical characteristics extracted from EEG signals. The present work uses 214 features which are capable of characterize the EEG signals from imagined speech in greater depth. Subsequently, a Genetic Algorithm was implemented, and the features containing the most significant information were chosen to

enter the classifier model. State-of-the-art methodologies report low accuracy, but the presented methodology is able to overcome this.

The following sections describe the methodology used to classify signals in imagined speech.

2. Methodology

The architecture of this work (Fig. 1) implies filtering the signals, feature extraction, optimize feature combinations using a genetic algorithm to maximize the accuracy of a classifier model. These processes will be described in the following sections.

a. Dataset

A database contains EEG signals from 5 male subjects between the ages of 23 and 30 years. Signals were obtained using a 14-channel Emotiv Epoc+ (Fig 2a) recording at 128Hz. The channels are specified in Fig 2b.

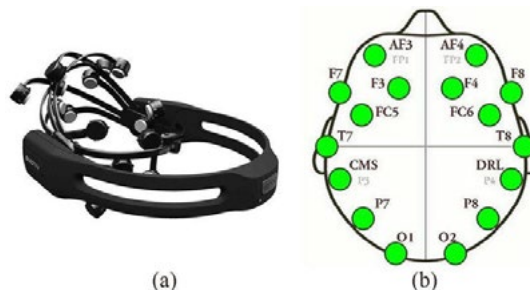


Figure 2a. Emotiv Epoc+.

Figure 2b. Electrode positions.¹

A graphical interface was developed that randomly plays the words through speakers while the user imagines speaking the word for 8 seconds, during which the device records EEG signals. The subject is required to remain still with their eyes closed. Then the recorded 8-second signals are divided

¹ Emotiv, "Validation of Emotiv EPOC for Extracting ERP Correlates of Emotional Face Processing," *Emotiv*, [Online].

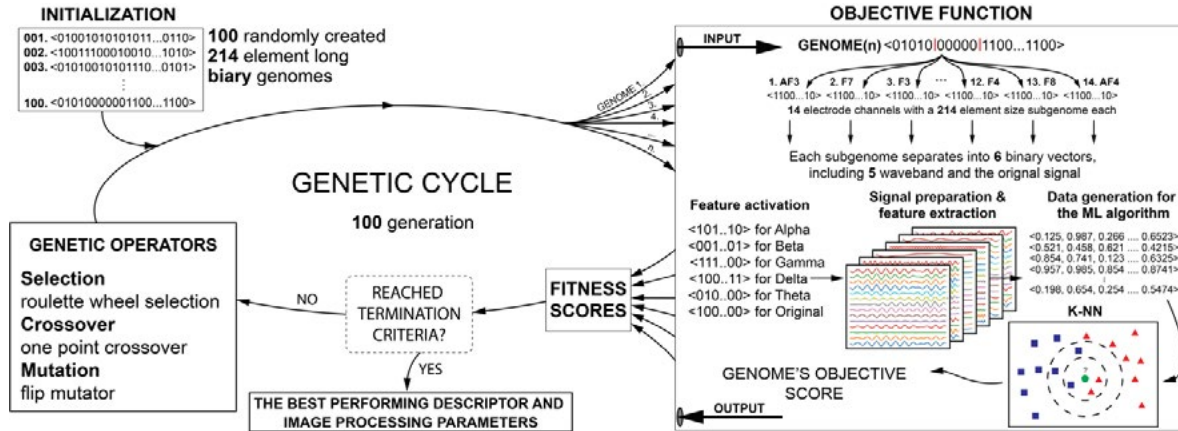


Figure 1. System architecture.

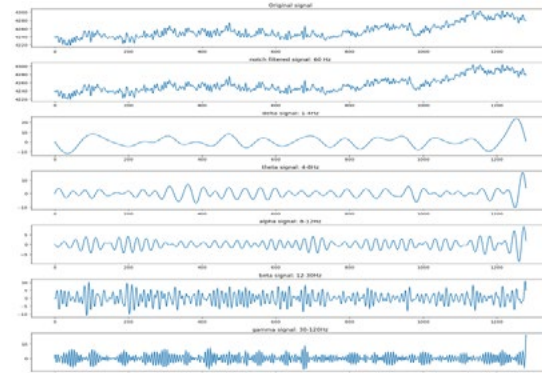
into 1-second segments (128 frames each) with an overlap of 16 frames. The dataset contains 225 recordings; therefore, it has a shape of a (225,14,128) tensor. Also, the data was split into train and test sets with an 80%-20% proportion.

b. Computational Resources

- CPU: Intel Core i5 11gen
- GPU: Nvidia RTX 3060ti
- Ram: 16 GB
- vRam: 8 GB
- OS: Windows 11
- Libraries: numpy, pandas, scipy, sklearn, matplotlib, antropy and signalityca².

c. Split signals into frequency bands

Each of the 14 channels was separated into five frequency bands associated with brain rhythms. For this, a 4th order band-pass butterworth filter³ was used, where the cutoff frequencies were (.5Hz, 4Hz), (4Hz, 8Hz), (8Hz, 13Hz), (13Hz, 30Hz), (30Hz, 40Hz) for



delta, theta, alpha, beta and gamma respectively (Fig. 3).

Figure 3. Example of a filtered EEG signal.

d. Feature Extraction

The 214-element-size feature vector contains 36 features extracted from six different layers of the same signal. The 36 features are described in the appendices section. The first 34 features were obtained from the raw unites signals, and 36 were extracted from each of the five separated bands. That adds up to 214 features to construct the features matrices.

The features were extracted from of the 14 channels; therefore, the shape of the feature matrices was (14, 214).

² Own authorship. Can be find in PyPi

³ As employed by [1][3][7][14]

e. Optimization with Genetic Algorithm

We seek the combination of features to maximize a Machine Learning model's accuracy. Because the number of possible combinations is enormous, the best choice is to use a GA, a metaheuristic that will optimize the selection of the optimal features.

The GA will generate a population of genomes to reproduce them and evolve them through generations. In this case, the genomes will be 214 length binary vectors indicating which features must be activated to improve.

The selection of the features will be optimized using a classic Machine Learning classification model, where the model's accuracy (2) is the objective function, converting this into a maximization problem.

The parameters of the Genetic Algorithm are the following:

- Number individuals: 100
- Type of gen: dichotomic {0,1}
- Number of genes: 214
- Type of selection: rank
- Type of crossover: single point
- Mutation: bit flip
- Fitness function: Accuracy

Upon reaching the end criterion, the GA returns the best genomes (binary arrays) in addition to the fitness obtained (the accuracy obtained with those feature activations of the binary arrays).

f. Data standardization

The data must be processed, normalized or standardized before entering the machine learning model to obtain better performance. The proposed model uses standardization (Eq. (1)).

$$z = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Where x_i is the data point to standardize, μ is the mean of all the data points in the column and σ is the standard deviation of the data in the column.

It is necessary to have all the data's attributes of the data in a standard scale, without distorting differences in the ranges of values or losing information.

g. Flatten data

As mentioned, the feature matrices have the shape (14, 214). However, the GA selects the best features. Therefore, the matrices now have the shape of (14, M) where M is the number of the features indicated by the genome. Since a classic ML model needs a data vector as input, the data point must be converted into the correct shape, flattening the features matrices of (14, M) to (1, 14xM) feature vectors.

h. Classifier model

The problem to be solved lies in the classification of EEG signals with an AI algorithm that knows how to discern when an EEG signal is associated with the thought of a particular word. The proposed method uses a classifier model to identify (predict) the imagined word by recognizing patterns and characteristics in the EEG signal. Separating databases into training and testing sets is a common step when working with classifier models. With the training set, the model recognizes, learns and adjusts to the patterns of the given signals. On the other hand, the testing set contains examples of new signals for the model, since it has not seen them. This set validates the accuracy of the model and its classification capacity.

As mentioned at the beginning, this work seeks to demonstrate that a classic machine-learning algorithm can classify imagined speech. For this reason, the k -NN algorithm is used due to its non-parametric nature,

Algorithm The k -nearest neighbors classification algorithm

Input:

D : a set of training samples $\{(\mathbf{x}_1, y_1), \dots, (\mathbf{x}_n, y_n)\}$

k : the number of nearest neighbors

$d(\mathbf{x}, \mathbf{y})$: a distance metric

x : a test sample

```

1: for each training sample  $(\mathbf{x}_i, y_i) \in D$  do
2:   Compute  $d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ , the distance between  $\mathbf{x}$  and  $\mathbf{x}_i$ 
3: Let  $N \subseteq D$  be the set of training samples with the  $k$  smallest distances  $d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ 
4: return the majority label of the samples in  $N$ 

```

Figure 4. Pseudo code for k-NN algorithm.⁴

adaptability to complex decision boundaries and effectiveness with small datasets. The pseudo-code for k -NN can be observed in Fig. 4.

For every individual in each generation of the GA, a heuristic is performed that searches for the values of $k = \{3, 5, 7, 9, 11, 13\}$ to find the one that gives the best ACC.

The final model’s performance was evaluated using the metrics accuracy, precision, recall and f1-score which can be found in Eqs. (2-5) respectively.

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (2)$$

$$precision = \frac{TP}{TP+TN} \quad (3)$$

$$recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (4)$$

$$f1\ score = \frac{2 \bullet precision \bullet recall}{recision + recall} \quad (5)$$

Where the elements of Eqs. (2-4) are: TP (True positives), TN (True negatives), FP (False positives) and FN (False negatives).

3. Results y discussion

We can observe that the genetic algorithm's performance (Fig. 5) started with an average accuracy below 70%. Nevertheless, the population's evolved, achieving an accuracy above of 90% after 60 generations.

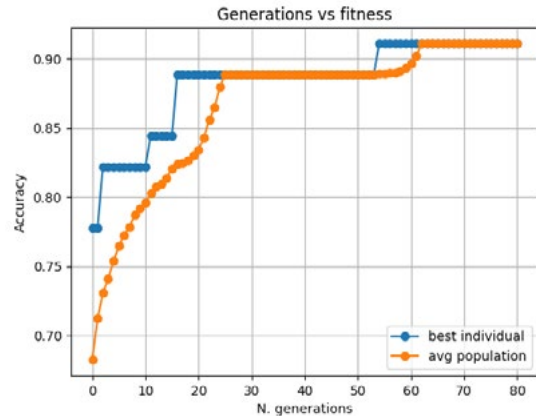


Figure 5. Genetic algorithm performance.

The genetic algorithm's output was the best genome, i.e. a binary vector of size 214, where the positions that contains 1's indicates that the feature associated to that position was activated.

The best solution found by the GA was:

best genome =

[1,1,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,1,
0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,
1,1,1,1,0,1,0,0,1,1,1,0,0,0,1,1,0,0,
0,0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,
1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,
0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,1,
1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,0,0,
1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,1,1,1,0,1,
0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,1,1,0,0,
0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,
1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,
1,0,1,1,1,0,0,0,1,1,1].

As the Feature Extraction section mentions, the first 34 elements correspond to features extracted from the original signal. The last 180 elements are five groups of 36 features. Each group corresponds to features in the delta, theta, alpha, beta and gamma bands respectively. Also, the algorithm returns the best k value for the k-NN algorithm. In this case, k=9 was the optimal value.

⁴ Figure extracted from R. Yehoshua, "k-Nearest Neighbours (KNN): A Comprehensive Guide" *Medium*, May 5, 2023. [Online].

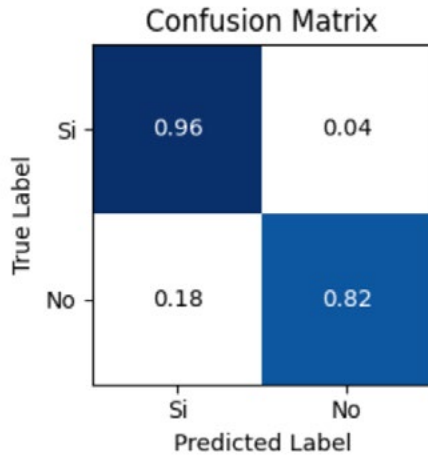


Figure 6. Confusion matrix of the experiment.

The outputs of the genetic algorithm were validated in a separate experiment. The data was split into train and test sets with a meticulous 80-20 proportion, ensuring that the validation process was thorough and reliable.

The features utilized were the ones indicated by the genetic algorithm such as the $k=9$ value for the k -NN classifier.

The performance of the classifier model can be observed in Fig. 4, which contains its respective confusion matrix.

The metrics were calculated from this matrix and can be observed in the Table 1.

Table 2 presents the differences between similar works in the state-of-the-art, such as the types of words utilized, the processing techniques and the classifier models. Also, in the last column we can spot the performance of each methodology, where our technique achieved the highest accuracy.

4. Conclusions

The proposed method demonstrates excellent performance in recognizing and distinguishing the simple Spanish words "Sí" (Yes) and "No." this work achieved higher accuracy thorough rigorous testing than existing methos in the current state-of-the-art literature.

Table 1. Performance metrics of the model.

	precision	recall	f1-score
0	0.90	0.96	0.93
1	0.93	0.82	0.87
accuracy			0.91
macro avg	0.92	0.89	0.90
weighted avg	0.91	0.91	0.91

The proposed approach not only effectively handles fundamental words but also outperforms previous techniques in terms of precision. This achievement highlights the robustness and efficiency of the method, showcasing its potential for applications that require accurate recognition of these basic yet crucial responses in Spanish, making it a significant contribution to the field.

In future work, it would be advisable to use genetic algorithms to select electrodes thereby only using those that contain the greatest information contribution.

Moreover, in future work we seek to use a database containing complex words of the language and test more classifier models of both ML and DL that surpass this work.

Appendices

The 36 proposed features are:

- mean
- standard deviation
- coefficient variation
- median
- mode
- max
- min
- first quartile
- third quartile
- inter quartile range
- kurtosis
- skewness

Table 2. Comparing with related works.

Article	Dataset (words)	Processing	Classifier	Accuracy
This work	'Sí', 'No'	Feature Extraction, Genetic Algorithm	k-NN	91%
[1]	'a', 'e', 'i', 'o', 'u'	ICA	CNN+TL	35.7%
[2]	'a', 'e', 'i', 'o', 'u'	Statistical characteristics	ELM, LDA, SVM	87%
[3]	'a', 'e', 'i', 'o', 'u'	Statistical characteristics	SVM, DT, LDA, QDA, PCA	79.7%
[4]	'Yes', 'No', 'Haan', 'Na'	Digital filters	ANN, SVM, RF, ADA	73.4%
[5]	'Yes', 'No'	ICA, digital filters and DWT	LDA, SVM, kNN, NB, MLP	63.16%

- detrended fluctuation analysis
- activity Hjorth param
- mobility Hjorth param
- complexity Hjorth param
- permutation entropy
- approximate entropy
- spectral entropy
- Higuchi fractal dimension
- total power spectral density
- centroid power spectral density
- determinism
- trapping time
- diagonal line entropy
- average diagonal line length
- recurrence rate
- spectral edge frequency 25
- spectral edge frequency 50
- spectral edge frequency 75
- hurst exponent
- singular valued decomposition entropy
- Petrosian fractal dimension
- Katz fractal dimension
- relative band power
- band amplitude

Acknowledgments

I thank the Autonomous University of Querétaro and the National Council of Humanities, Sciences and Technologies

(CONAHCYT) for granting me the scholarship that made possible my full-time dedication to this research.

References

- [1] C. Cooney, R. Folli, and D. Coyle, "Optimizing Layers Improves CNN Generalization and Transfer Learning for Imagined Speech Decoding from EEG," in *International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Bari, Italy: IEEE, Oct. 2019.
- [2] B. Min, J. Kim, H. J. Park, and B. Lee, "Vowel Imagery Decoding toward Silent Speech BCI Using Extreme Learning Machine with Electroencephalogram," *Biomed Res Int*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/2618265.
- [3] T. Morooka, K. Ishizuka, and N. Kobayashi, "Electroencephalographic Analysis of Auditory Imagination to Realize Silent Speech BCI," in *2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics, GCCE 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2018, pp. 73–74. doi: 10.1109/GCCE.2018.8574677.

- [4] A. Balaji, A. Haldar, K. Patil, S. Ruthvik, and V. Baths, "EEG-based Classification of Bilingual Unspoken Speech using ANN."
- [5] A. Rezazadeh Sereshkeh, R. Trott, A. Bricout, and T. Chau, "EEG Classification of Covert Speech Using Regularized Neural Networks," *IEEE/ACM Trans Audio Speech Lang Process*, vol. 25, no. 12, pp. 2292–2300, Dec. 2017, doi: 10.1109/TASLP.2017.2758164.
- [6] G. Hernández Nava, "Predicción de eventos epilépticos mediante técnicas de aprendizaje profundo usando señales EEG," UAQ, Querétaro, 2023.
- [7] J. T. Panachakel, A. G. Ramakrishnan, and A. G. Ramakrishnan, "Decoding Imagined Speech using Wavelet Features and Deep Neural Networks," Mar. 2020, doi: 10.1109/INDICON47234.2019.9028925.
- [8] Y. Li, L. Wu, T. Wang, N. Gao, and Q. Wang, "EEG Signal Processing Based on Genetic Algorithm for Extracting Mixed Features," *Intern J Pattern Recognit Artif Intell*, vol. 33, no. 6, Jun. 2019, doi: 10.1142/S0218001419580084.
- [9] H. Ocak, "Optimal classification of epileptic seizures in EEG using wavelet analysis and genetic algorithm," *Signal Processing*, vol. 88, no. 7, pp. 1858–1867, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.sigpro.2008.01.026.
- [10] A. Albasri, F. Abdali-Mohammadi, and A. Fathi, "EEG electrode selection for person identification thru a genetic-algorithm method," *J Med Syst*, vol. 43, Sep. 2019, doi: 10.1007/s10916-019-1364-8.
- [11] K. koizumi, K. Ueda, and M. Nakao, "Development of a Cognitive Brain-Machine Interface Based on a Visual Imagery Method," in *40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Honolulu, HI, USA: IEEE, 2018, pp. 1062–1065.
- [12] J. S. García-Salinas, L. Villaseñor-Pineda, C. A. Reyes-García, and A. A. Torres-García, "Transfer learning in imagined speech EEG-based BCIs," *Biomed Signal Process Control*, vol. 50, pp. 151–157, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.bspc.2019.01.006.
- [13] S. H. Lee, M. Lee, J. H. Jeong, and S. W. Lee, "Towards an EEG-based intuitive BCI communication system using imagined speech and visual imagery," in *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2019, pp. 4409–4414. doi: 10.1109/SMC.2019.8914645.
- [14] P. Saha, M. Abdul-Mageed, and S. Fels, "Deep Learning the EEG Manifold for Phonological Categorization from Active Thoughts," Apr. 2019, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1904.04358>

TEEN: Encoder para series de tiempo multivariadas con diferente frecuencia

TEEN: Encoder for Multivariate Time Series with different frequency

Quiroz Calvillo Edgar Adrian, García Noguez Luis Roberto
Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería
Querétaro, México
edgar.aqzc@gmail.com

Palabras clave: IAR, Series de Tiempo Multivariadas, Modelos codificadores de Redes Transformers, Autocorrelación, Frecuencia de muestreo, Auto-atención

Resumen- Este artículo presenta TEEN, un encoder para el análisis y predicción de series de tiempo multivariadas con diferente frecuencia de muestreo. El modelo propuesto aborda la complejidad de trabajar con series que tienen diferentes frecuencias temporales, un problema común en aplicaciones financieras e industriales. Utilizando capas de autocorrelación optimizadas y una arquitectura basada en el Autoformer, el encoder logra capturar relaciones temporales entre las series sin necesidad de alineación o interpolación. Los experimentos realizados con datos financieros de empresas tecnológicas y bancarias muestran que TEEN supera modelos tradicionales como ARIMA, redes neuronales recurrentes LSTM, bidireccionales y convolucionales en 26 de los 33 casos, mejorando significativamente las métricas de error como RMSE, MAE y MAPE.

Keywords: IAR, Multivariate Time Series, Encoder models of Transformers Networks, Autocorrelation, Sample frequency, Auto-attention

Abstract- This article introduces TEEN, an encoder for analyzing and predicting multivariate time series with different sampling frequencies. The proposed model addresses the complexity of working with time series with varying temporal frequencies, a common issue in financial and industrial applications. By utilizing optimized autocorrelation layers and an Autoformer-based architecture, the encoder captures temporal relationships between the series without needing alignment or interpolation. Experiments conducted with financial data from technology and banking companies demonstrate that TEEN outperforms traditional models such as ARIMA, LSTM recurrent neural networks, bidirectional, and convolutional networks in 26 out of 33 cases, significantly improving error metrics such as RMSE, MAE, and MAPE.

1. Introducción

Las series de tiempo multivariadas se refieren a una colección de varias variables de series temporales que se utilizan juntas para pronosticar resultados futuros. El análisis de las series de tiempo multivariadas representa un reto debido a la complejidad de los modelos estocásticos que suelen estar involucrados. Aunque tradicionalmente se ocupen modelos como el autorregresivo de media móvil con variable exógena (ARMAX)

o espacios de estado como los que describe Shumway [1], estos presentan pobres resultados predictivos ya que los problemas son muy variados y hay poca opción para elección de modelos. Este tipo de problemas son muy comunes en el mundo real, sin embargo, es normal que los datos recopilados presenten diferente frecuencia en sus intervalos de tiempo. Este fenómeno ocurre cuando las variables bajo estudio se registran a ritmos distintos, lo que introduce desafíos adicionales en el análisis y la modelización. Por ejemplo,

común que los indicadores financieros se recopilan diariamente, mientras que los datos de estados financieros o tasas de desempleo pueden estar disponibles mensualmente o trimestralmente.

Durante la revisión de publicaciones científicas los autores no encontraron trabajos que analicen series de tiempo de diferente frecuencia implementando modelos de redes transformers. Los trabajos revisados que presentan la misma problemática suelen aplicar alguna transformación elegida dependiendo de la naturaleza de los datos para obtener una nueva serie que coincida en frecuencia. En este sentido, Carballo-Fraguas [2] aplica una transformación llamada matriz histórica que condensa la información de un periodo de tiempo en muestras con intervalos más grandes para tener mayor consistencia en los datos. Por su parte, Romero-Aguilar [3] utiliza Bootstrapping como técnica de remuestreo para el manejo de indicadores económicos trimestrales. Sin embargo, este tipo de transformaciones pierden información de la estructura temporal natural de la serie de tiempo. por lo cual el desajuste en las frecuencias de las series de tiempo multivariadas presenta problemas tanto desde el punto de vista metodológico como computacional. Por un lado, los modelos tradicionales, como el Vector Autoregressive (VAR) [4] o el Vector Error Correction Model (VECM), asumen una estructura temporal uniforme que no es compatible con datos desigualmente espaciados. Por otro lado, las estrategias de interpolación o alineación de datos a menudo sacrifican la información valiosa inherente a cada serie individual. Por su parte, en el área de la inteligencia artificial se han utilizado diferentes tipos de modelos para trabajar con series de tiempo, aunque no enfocadas en el problema de la diferencia en frecuencia. El uso de Graph Neural networks (GNN) [5] como las arquitecturas recurrentes Recurrent Neural Network RNN y

Long-Short Term Memory LSTM [6], [7] además de variantes de la arquitectura transformer modificadas para su uso en series de tiempo como el informer [8] y autoformer [9] se han vuelto muy populares en la predicción de series de tiempo mediante redes neuronales.

En cuanto a los trabajos que emplean redes Transformers para analizar series de tiempo podemos mencionar a Liu et al. [10] quienes utilizan una capa convolucional junto con un encoding positional para entender las dependencias temporales. En ese sentido, Wu et al. [9] modificaron el algoritmo de auto atención descrito por Vasawani et al. [11], donde añaden un bloque de descomposición de los bloques cíclicos y estacionales de la serie y cambian la auto atención por autocorrelación. Rui et al. [12] por su parte utiliza un algoritmo de autoatención en conjunto con una capa convolucional para entender la estructura temporal.

Por otro lado, Zhou [8] emplea un encoder basado en Multicabezas de autoatención para entender estructuras temporales. Ding et al. [13] por su parte usa capas de auto-atención en conjunto con capas convolucionales. En el modelo de autoformer, el encoder utilizado se compone por bloques de descomposición de la serie y mecanismos de autocorrelación en lugar de la autoatención.

En este artículo se modelan y predicen series de tiempo multivariadas con diferentes frecuencias utilizando capas de descomposición y autocorrelación basadas en las capas de autoatención de los transformers que permiten integrar estructuras temporales sin perder la interdependencia entre ellas. Asimismo, se propone un método para analizar múltiples series de tiempo con diferente frecuencia, es decir, con diferentes intervalos de muestreo usando un modelo codificador de las redes transformers.

2. Metodología

A continuación, se describe la metodología propuesta para analizar las series de tiempo multivariadas con diferente frecuencia.

A. Características de las series de tiempo con múltiple frecuencia

Sea X_t una sucesión ordenada de variables aleatorias $[X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]$ donde X_1 es el valor de la serie de tiempo en el primer punto del tiempo, X_2 es el valor de la serie de tiempo en el segundo punto del tiempo, etc. Cada serie de tiempo tiene relacionados componentes que representan su comportamiento: Tendencia ($T(t)$): Representa la dirección en la que se mueven los datos a lo largo del tiempo, ya sea ascendente, descendente o constante. Estacionalidad ($S(t)$): Son los patrones que se repiten de forma regular en intervalos de tiempo que pueden ser diarios, mensuales, anuales, etc. Ciclos ($C(t)$): Son fluctuaciones de largo plazo que no siguen un patrón fijo de repetición. Ruido ($w(t)$): Es la parte aleatoria de la serie de tiempo, generalmente se representa como una variable aleatoria con distribución $w \sim N(0, \sigma^2)$.

$$X(t) = f(T(t), S(t), C(t), w(t)) \quad (1)$$

Se definen "m" series de tiempo $X_{i,t}$ con $i = 1, 2, \dots, m$ entendiendo que i representa al componente y t el momento en el tiempo. Entonces, de acuerdo a Wei [14] podemos entender a la variable aleatoria $Z_t = [X_{1,t}, X_{2,t}, X_{3,t}, \dots, X_{m,t}]$ como un vector de series de tiempo o "Series de tiempo multivariadas" donde su principal característica es que depende tanto de sus componentes i como del tiempo t . Tanto Wei [14] como Shumway [1] utilizan tiempos discretos $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ordenados e iguales en todas las series.

Aunque Shumway como Wei [1], [14] hablan sobre diferentes tratamientos de las series cuando se presentan datos faltantes como las ecuaciones de filtrado utilizadas en [1] para reemplazarlos, no se propone una metodología para series que naturalmente tienen diferente frecuencia, i.e. que para los componentes $X_{i,t}$ y $X_{j,t}$ sus tiempos no necesariamente son iguales, es decir, aunque se cumpla que $t_{n,i} = t_{n,j}$ el siguiente paso temporal es desigual $t_{n+1,i} \neq t_{n+1,j}$, incluso que por la naturaleza de las series ni siquiera el primer momento sea igual, i.e. $t_{0,i} \neq t_{0,j}$. La Fig.1 muestra un ejemplo de la serie multivariada de Nvidia.

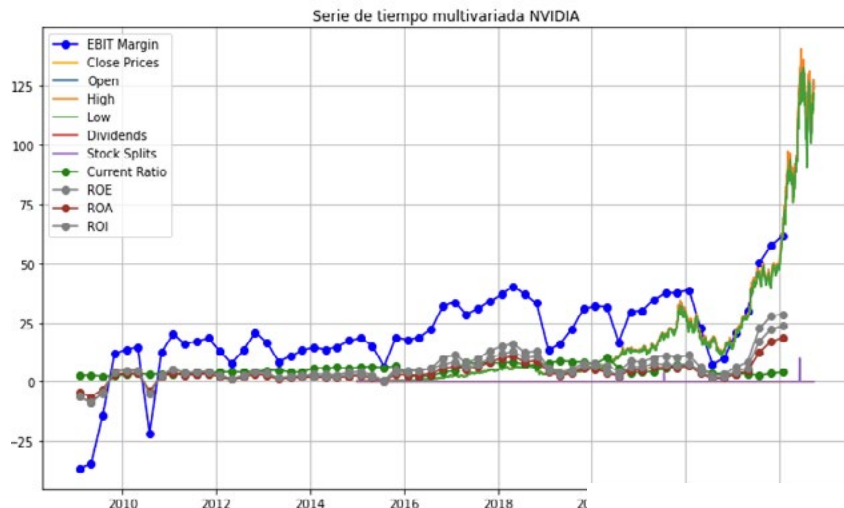


Figura 1. Serie de tiempo Multivariada de Nvidia.

Por lo tanto, se define un proceso multivariado de series de tiempo con diferente frecuencia como:

$$Z_t = [Z_{1,t1}, Z_{2,t2}, Z_{3,t3}, \dots, Z_{m,tm}] \quad (2)$$

Donde $Z_{i,ti}$ es la serie de tiempo del componente i con frecuencia ti .

B. Estructuras temporales en redes neuronales

Para representar los componentes de una serie de tiempo descritos en la sección anterior en la ecuación (1), se utilizan los embeddings (embebidos), encoders (codificador) y los decoders (decodificador).

1. Embeddings temporales

Para capturar las dependencias temporales se utilizan capas **embeddings** para transformar una serie de tiempo en una representación de menor dimensión o en un espacio de características. Esta representación facilita que las redes neuronales y otros modelos puedan procesar secuencias de datos temporales con una mayor eficiencia y capacidad de generalización.

Liu et al. [10] utilizan una capa convolucional junto con un encoding posicional para entender las dependencias temporales. Wu et al. [9] modificaron el algoritmo de auto atención descrito por Vasawani [11], donde añaden un bloque de descomposición de los bloques cíclicos y estacionales de la serie y cambian la auto atención por autocorrelación.

Rui por su parte [12], utiliza un algoritmo de auto-atención en conjunto con una capa convolucional para entender la estructura temporal.

2. Encoders

Un encoder es una capa de una red profunda diseñada para aprender una representación

más abstracta de los datos de entrada [15]. Los encoders son responsables de procesar los resultados de los embeddings para extraer patrones, características, o representaciones más abstractas de los datos. Mientras que los embeddings transforman las entradas en vectores densos, el encoder toma estos vectores y aprende una representación más rica y abstracta que capture las dependencias y relaciones complejas dentro de los datos. Zhou et al. [8] utilizan un encoder basado en Multi-cabezas de auto-atención para entender estructuras temporales. Nie et al. [16] por su parte usa capas de auto-atención en conjunto con capas convolucionales. En el modelo de autoformer [9], el encoder utilizado se compone por bloques de descomposición de la serie y mecanismos de autocorrelación en lugar de la auto-atención.

3. Decoder

El decoder funciona como una transformación inversa del encoder, mientras este procesa una secuencia de entrada y genera una representación comprimida, el decoder toma esa representación y genera la secuencia de salida paso a paso. El objetivo es que el resultado final del decoder sea capaz de dar la predicción reconstruyendo la estructura temporal inicial. En el modelo de LogTrans [16] utilizaron un iterative multi-step, el informer [8] un direct multi-step (DMS) y por su cuenta en el autoformer [9] en conjunto con el DMS agregan la función de autocorrelación y los bloques de descomposición utilizados en el encoder.

2.1 Temporal Encoder TEEN

En esta investigación se propone un modelo basado en los encoder de atención autocorrelativa [9] sin el componente del decoder (Fig. 2). El objetivo es entender los patrones temporales de las series auxiliares y

suavizar el impacto en la serie dependiendo de su diferencia en el intervalo de frecuencia.



Figura 2. Arquitectura del temporal encoder TEEN.

1. Entrada de los Datos

Los datos de entrada (X) representan una serie de tiempo multivariable con diferente frecuencia en el intervalo de muestreo. Estos datos se dividen entre las series con diferente frecuencia secundarias y la serie a predecir (Fig. 2), se agrupan en lotes y se preparan para pasar a través del modelo.

2. Embedding

Los valores de las series de tiempo secundarias pasan primero por la capa de embedding, la cual aplica una convolución 1D con un filtro de tamaño 3 a los datos de entrada, transforma los datos originales de las series de tiempo en un espacio de características de mayor dimensionalidad. Esto permite que el modelo trabaje con una representación más rica de los datos antes de pasar por las capas más complejas. También se aplica una capa de dropout para regularizar el modelo.

3. Encoder

La capa encoder aplica una operación de atención autocorrelativa para capturar patrones a largo plazo en las series de tiempo.

En el proceso de la obtención de autocorrelación:

- Se calculan las representaciones de las consultas (q), las llaves (k) y los valores (v) a partir de la entrada. Se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT) para calcular la autocorrelación de los vectores de consulta y clave.
- Se multiplica el valor de atención autocorrelativa $q \cdot k$ con v para obtener la representación autocorrelativa de la entrada.

Después se utiliza una red feed-forward (FNN) para transformar los datos después de la atención. En esta se aplican dos capas densas con activación relu y normalización, transformando la salida de la atención.

Al final se aplica normalización de la capa y dropout para evitar sobre-ajuste.

La capa encoder al final produce una representación enriquecida que captura relaciones temporales a través de autocorrelaciones.

4. Concatenación de la diferencia de frecuencia



Se concatena la salida del encoder con la variable que nos dará la diferencia temporal en el intervalo de muestreo. Esta variable no entra directamente al proceso de autocorrelación, pero se añade a la salida final.

5. *Embedding Convolutional*

Después de concatenar la variable de diferencia temporal con la salida del encoder, se pasa por una capa convolucional 1D que aplica filtros de convolución para calcular el suavizamiento temporal a aplicar y así extraer características de la entrada combinada, generando una nueva representación más rica.

6. *Salida*

La salida de la capa convolucional se reduce a la dimensión de salida mediante una capa densa. El resultado se concatena a la serie de tiempo principal y se prepara para entrar a la capa predictiva final que genera la predicción.

7. *Diferencias con el autoformer*

Autoformer: Utiliza un mecanismo de atención basado en el principio de atención escalada, donde las proyecciones de Q y K son multiplicadas directamente.

TEEN: Utiliza la autocorrelación en las proyecciones de Q y K, lo que permite que la atención se base en las correlaciones temporales explícitas en lugar de las relaciones directas entre los elementos de la serie de tiempo.

2.2 Experimentación

1. *Datos*

Para evaluar el desempeño del TEEN se obtuvieron series de tiempo del ámbito financiero relacionadas a la cotización de acciones en el mercado de valores de 12 diferentes empresas, 7 de tecnología (Apple, Microsoft, Amazon, Google, Meta Platforms,

Morgan, Bank of America, Wells Fargo & Co, Citi Group Inc, Goldman Sachs). Estas cuentan con una ventana temporal de 31/01/2009 al 30/06/2024. Ejemplo Figura 1

Las series de tiempo constan de los datos relacionados al movimiento diario del precio de la acción con frecuencia de muestreo diaria: Open: Precio inicial en el que se abrió el valor de la acción en el día. High: Precio más alto cotizado por la acción durante el día. Low: Precio más bajo cotizado por la acción durante el día. Close: Precio con el que cerró la cotización. Volume: Cantidad de acciones que se negociaron durante el día. Dividends: Dividendos pagados por la empresa a sus accionistas. Stock Splits: Multiplicar el número de acciones.

Y los ratios obtenidos de los reportes trimestrales "Form 10 Q" publicados por la Security and Exchange Commission (SEC): EBIT Margin, Current Ratio, ROE - Return On Equity, ROA - Return On Assets, ROI Return On Investment.

2. *Métodos de referencia*

Se utilizan 3 modelos de series de tiempo como base para comparar el rendimiento del TEEN, incluyendo un modelo ARIMA, una red bidireccional LSTM, una red convolucional en conjunto con una red LSTM. Dado que ninguno de estos métodos está diseñado para series con diferente frecuencia de muestreo, se utiliza una transformación en diferencia para solo agregar el valor en el día que coinciden las series trimestrales con la serie principal.

La comparación se hace mediante 3 métricas para revisar el error en las predicciones con respecto al valor real, la raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés), el error absoluto medio (MAE por sus siglas en inglés) y el error porcentual absoluto medio (MAPE por sus siglas en inglés).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (5)$$

Donde: y_i =valor actual. $\hat{y}_i$ =valor predicho.
 n =número de observaciones.

3. Resultados y discusión

En las fig. 3 y 4 se presentan los resultados de los modelos en las diferentes series de tiempo multivariadas. Se puede observar que el modelo TEEN supera al resto en 26 de los 33 casos.

Empresa	arima rmse	arima mae	arima mape	bid rmse	bid mae	bid mape	conv rmse	conv mae	conv mape	Teen rmse	Teen mae	Teen mape
aapl	3.208	2.360	1.347	2.512	1.846	0.047	2.636	1.997	0.047	2.504	1.897	0.044
msft	61.505	61.261	14.812	5.161	4.014	0.038	5.135	4.034	0.039	4.878	3.832	0.037
amzn	6.334	5.795	3.216	2.734	2.084	0.051	2.817	2.058	0.019	2.676	1.955	0.018
googl	4.718	3.809	2.432	2.891	1.963	0.065	2.310	1.824	0.081	2.195	1.733	0.077
nvda	31.180	25.000	2.883	24.154	17.275	0.141	23.586	16.937	0.141	22.407	16.090	0.134
tsla	22.543	21.559	12.562	6.387	4.708	0.117	7.469	5.662	0.077	7.096	5.379	0.073
bac	0.462	1.258	0.580	2.100	1.496	0.060	2.080	1.476	0.058	1.976	1.403	0.055
jpm	15.109	7.836	15.300	0.506	0.384	0.059	0.486	0.364	0.058	0.462	0.346	0.055
wfc	1.741	2.988	1.833	0.750	0.538	0.075	0.730	0.518	0.069	0.694	0.492	0.066
c	4.147	6.885	4.213	0.775	0.603	0.070	0.765	0.583	0.066	0.726	0.553	0.062
gs	25.122	6.082	25.682	5.327	3.858	0.055	5.307	3.608	0.058	5.041	3.428	0.055

Figura 3. Resultados de las métricas por modelo.

Empresa	arima rmse	arima mae	arima mape	bid rmse	bid mae	bid mape	conv rmse	conv mae	conv mape	Teen rmse	Teen mae	Teen mape
aapl	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
msft	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
amzn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
googl	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
nvda	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
tsla	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
bac	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
jpm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
wfc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
gs	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
Best perform	1	1	0	1	2	2	0	0	0	9	8	9

Figura 4. Comparación del rendimiento de cada modelo.

4. Conclusiones

En este artículo se estudió un problema poco explorado como lo es las series de tiempo con diferente frecuencia de muestreo, un problema muy común del mundo real. Sin embargo, la complejidad de los patrones temporales limita el rendimiento de los modelos. La propuesta de este encoder temporal es que sea capaz de descomponer los atributos de las series de tiempo secundarias que permitan representar la afectación de estos fenómenos en la serie principal mediante el uso de atención autocorrelativa en conjunto con el

Referencias

- [1] D. S. S. R. H. Shumway, Time Series Analysis and its Applications With R-examples (Springer Science+Business Media, 2017).
- [2] P. Carballo-Fraguas, "Técnicas de remuestreo en modelos de predicción semiparamétricos de series de tiempo," España, 2024.
- [3] R. Romero-Aguilar, "Una propuesta para medir el ciclo económico," econoquantum, vol. 21, no. 1, pp. 39–58, Dec. 2023, doi: 10.18381/eq.vi21i1.7325.
- [4] L. Chang and Y. Shi, "A discussion on the robust vector autoregressive models: novel evidence from safe haven assets," Ann Oper Res, vol. 339, no. 3, pp. 1725–1755, Aug. 2024, doi: 10.1007/s10479-022-04919-6.



- [5] M. Jin et al., "A Survey on Graph Neural Networks for Time Series: Forecasting, Classification, Imputation, and Anomaly Detection," Jul. 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2307.03759>.
- [6] T. H. H. Aldhyani and A. Alzahrani, "Framework for Predicting and Modeling Stock Market Prices Based on Deep Learning Algorithms," *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/e11193999.
- [7] D. Kumar, P. K. Sarangi, and R. Verma, "A systematic review of stock market prediction using machine learning and statistical techniques," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 3187–3191. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.399.
- [8] H. Zhou et al., "Informer: Beyond Efficient Transformer for Long Sequence Time-Series Forecasting," 2021. [Online]. Available: www.aiai.org
- [9] J. Xu, J. Wang, and M. Long, "Autoformer: Decomposition Transformers with Auto-Correlation for Long-Term Series Forecasting," 2021. [Online]. Available: <https://github.com/thuml/Autoformer>.
- [10] C. Liu et al., "Spatial-Temporal Large Language Model for Traffic Prediction," 2024. [Online]. Available: <https://github.com/ChenxiLiu-HNU/ST-LLM>.
- [11] A. Vaswani et al., "Attention Is All You Need," USA, 2017.
- [12] Z. Sun, W. Zhang, A. A. Liu, and Z. Wei, "Enhancing ENSO predictions with self-attention ConvLSTM and temporal embeddings," *Front Mar Sci*, vol. 11, 2024, doi: 10.3389/fmars.2024.1334210.
- [13] L. Ding, J. Zhang, K. Zhang, H. Guo, B. Liu, and L. Bruzzone, "Joint Spatio-Temporal Modeling for the Semantic Change Detection in Remote Sensing Images," Dec. 2022, doi: 10.1109/TGRS.2024.3362795.
- [14] W. W. Wei, "Multivariate time series analysis and applications," John Wiley & Sons, no. 3, 2018, doi: 10.1017/S0266078412000235.
- [15] K. Berahmand, F. Daneshfar, E. S. Salehi, et al., "Autoencoders and their applications in machine learning: a survey," *Artif. Intell. Rev.* 57, 28 (2024).
- [16] X. Nie, X. Zhou, Z. Li, et al., "Logtrans: Providing efficient local-global fusion with transformer and cnn parallel network for biomedical image segmentation," in *2022 IEEE 24th IntConf on High Performance Computing Communications; 8th Int Conf on Data Science Systems*.

Diseño de una bomba de desplazamiento para microfluidos

Design of a displacement pump for microfluidics

Jiménez-Bautista, Elías; Torres-SanMiguel, Christopher René.

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Gustavo A. Madero, Col. Lindavista, Ciudad de México C.P. 07738, México.

E-mail: ctores@ipn.mx

Palabras clave: Diseño, microfluidos, bomba peristáltica, simulación.

Resumen- En los últimos años la miniaturización de dispositivos ha sido tendencia mundial, integrándose en plataformas para múltiples análisis con menores muestras y reactivos; donde el uso de bombas peristálticas destaca para el control del caudal, presión y flujo constante. En aplicaciones de filtración y separación de partículas, es indispensable alcanzar un caudal de 250 mL/min ; ante esto, esta investigación presenta el diseño de una bomba de desplazamiento de microfluidos que alcance dicho flujo, basado en las metodologías *Design Thinking (DT)* y *Análisis de Modo y Efecto de Fallos (AMEF)*. Simulaciones CFD con Solidworks® validaron las velocidades máximas en el fluido, los resultados muestran que la geometría del cabezal de la bomba permite alcanzar una velocidad de 1.4 m/s , proporcionan una visión del comportamiento del flujo y la distribución de presión en el diseño de la bomba peristáltica.

Keywords: Design, microfluidics, peristaltic pump, simulation.

Abstract- In recent years, the miniaturization of devices has been a global trend, integrating them into platforms for multiple analyses with fewer samples and reagents; where the use of peristaltic pumps stands out for the control of flow rate, pressure and constant flow. In particle filtration and separation applications, it is essential to reach a flow rate of 250 mL/min ; In view of this, this research presents the design of a microfluidic displacement pump that reaches this flow, based on the *Design Thinking (DT)* and *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* methodologies. CFD simulations with Solidworks® validated the maximum velocities in the fluid, the results show that the geometry of the pump head allows reaching a speed of 1.4 m/s , providing an insight into the flow behaviour and pressure distribution in the design of the peristaltic pump.

1. Introducción

En los últimos años el desarrollo de la tecnología microfluidica ha proporcionado nuevas plataformas para la separación y filtración de partículas, en donde la manipulación de pequeños volúmenes de fluidos permite combinar diferentes procesos, que pueden ser automatizados e integrados en sistemas más complejos para llevar a cabo una

cascada de operaciones analíticas en su interior en un solo dispositivo [1]. De manera general en los microfluidos existen dos formas en la que se genera el flujo: a través de sistemas pasivos y sistemas activos [2]. La manipulación pasiva de fluidos se ayuda de los fenómenos físicos como la tensión superficial, capilaridad, osmosis y gravedad, por lo que no se requieren fuentes de energía externas para provocar el impulso del fluido; sin embargo, este tipo de métodos es inexacto y no genera

un caudal constante en el fluido; mientras que el desplazamiento de fluidos por métodos activos, hace uso de dispositivos que por medio de fuerzas externas permiten controlar el caudal del fluido con precisión [3].

Dentro de los métodos activos de desplazamiento de microfluidos el uso de bombas peristálticas es el que mejor destaca, ya que estas se emplean para transportar una variedad de fluidos minimizando la contaminación cruzada, dado que el fluido es capturado por completo en un tubo flexible a través de ciclos de bombeo. El tubo flexible se sitúa entre un conjunto de rodillos acoplados a un cabezal giratorio y una carcasa fija, en donde los rodillos comprimirán el tubo y atraparán un volumen de fluido entre los rodillos adyacentes, esta disposición de elementos hace atractiva a este tipo de bombas para diversas aplicaciones como químicas, médicas, de procesamiento de alimentos e industriales. El tubo flexible debe seleccionarse de acuerdo al fluido bombeado y con ciertas características mecánicas que le permitan tener un menor desgaste o desgarres en su superficie externa debida a la compresión de los rodillos [4][5][6].

A pesar de los avances en la mejora del diseño de dispositivos para desplazar microfluidos, sigue existiendo desafíos en estos dispositivos como la minimización en las pérdidas de flujo, reducir la contaminación cruzada y alcanzar los flujos deseados para ciertas aplicaciones, por lo que este trabajo de investigación presenta el diseño de una bomba de desplazamiento para microfluidos basada en las características de las metodologías *Desing Thinking (DT)* y del *Análisis de Modo y Efecto de Fallos (AMEF)* donde se reportan las variables más relevantes para el diseño del mismo, así mismo se presenta una simulación de flujo por medio de la paquetería de Solidworks®, donde se observan las velocidades máximas alcanzadas por el flujo

de acuerdo a las condiciones frontera definidas.

2. Materiales y método

La metodología empleada para el diseño del dispositivo de desplazamiento de microfluidos toma las características del *Desing Thinking (DT)* y del *Análisis de Modo y Efecto de Fallos (AMEF)*, el *DT* permite desarrollar productos con base tecnológica, fundamentado en las necesidades del usuario final que tiene como fin obtener productos funcionales para solucionar necesidades reales, mientras que el *AMEF* busca identificar los riesgos potenciales del diseño mecánico, exponiendo los sistemas críticos que requieran análisis más detallados en busca identificar los riesgos potenciales del diseño mecánico [7][8], en la Figura 1 se muestra el esquema de la metodología empleada la cual combina las características del *DT* y *AMEF*.

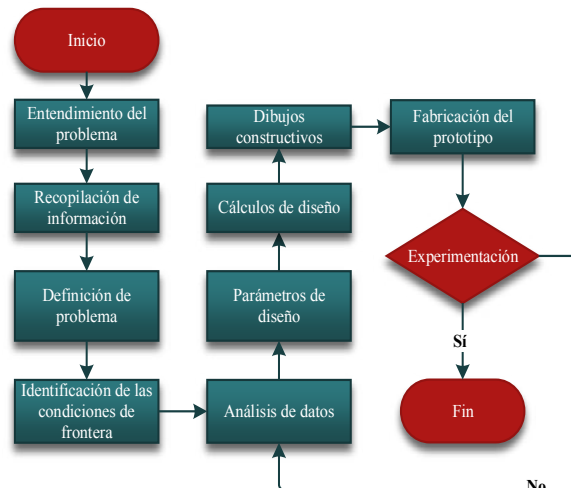


Figura 1. Metodología empleada

2.1 Condiciones de frontera

Las condiciones frontera para el diseño de la bomba peristáltica son los parámetros que define los límites de operación y las restricciones dentro de las cuales el dispositivo debe funcionar adecuadamente, la Tabla 1 muestra las condiciones frontera para este caso de estudio.

Tabla 1. Condiciones de frontera

Flujo máximo	250 mL/min
Presión máxima de operación	40 kPa
Número de Reynolds	< 2000
Temperatura máxima de operación	37 °C
Densidad máxima del fluido	1000 kg/m ³
Diámetro interno del tubo grado médico	2 mm

La presión de operación se tomó considerando los valores típicos en bombas peristálticas de infusión basados en las normativas internacionales IEC 60601-2-24 e ISO 8536-4:2010 [9], [10].

2.2 Diseño CAD

A partir de las condiciones frontera, la variable de mayor interés para el dimensionamiento de la bomba es el caudal de 250 mL/min, con este dato, junto con la propuesta de un radio de giro de 15 mm y el diámetro interno de 2 mm de la manguera flexible, se parametrizaron los requerimientos de la bomba que permitieron construir un diseño asistido por computadora (CAD) con la paquetería de Solidworks®. Con el caudal requerido y la sección transversal de la manguera flexible por donde pasa el fluido, es posible calcular la velocidad (v) a la este se desplaza, al despejar v de la Ecuación 1, la cual dio como resultado una velocidad promedio de 1.32 m/s.

$$Q = Av \left[\frac{m^3}{s}; \frac{mL}{min} \right] \quad (1)$$

- Q : Caudal ($\frac{m^3}{s}; \frac{mL}{min}$)
- A : Sección transversal m^2
- v : $\frac{m}{s}$

Por otro lado, asumiendo un radio de giro de 15 mm medido desde el centro del eje del rotor hasta el centro del rodamiento que comprime al tubo, se calculó el número de revoluciones al que debe girar el rotor para

poder alcanzar el flujo descrito, despejando N de la Ecuación 2 [9].

$$Q = 0.5 \cdot \pi^2 \cdot d_i^2 \cdot N \cdot r \left[\frac{cm^3}{min} = \frac{mL}{min} \right] \quad (2)$$

$$N = \frac{Q}{0.5 \cdot \pi^2 \cdot d_i^2 \cdot r} \cdot \frac{1}{2 \text{ canales}}$$

- d_i : Diámetro interno (cm)
- N : Revoluciones (rpm)
- r : Radio de jiro (cm)

Resolviendo el despeje de la Ecuación 2 se obtiene una velocidad de rotación de 844 rpm, sin embargo, para mantener un diseño de menor proporciones se opta por un diseño bicanal en la carcasa, reduciendo de esta manera la velocidad de rotación a la mitad, lo que implica un motor de menores dimensiones.

Respecto al volumen de fluido desplazado por revolución es indispensable definir el número de rodillos que comprimirán a la manguera, para este caso en particular se propuso un total de 6 rodillos con un desfase de 60° entre sí. Esta cantidad de rodillos permite suavizar las pulsaciones del flujo debidas a la compresión de la manguera. Estos parámetros son importantes ya que al obtener el volumen desplazado se puede obtener el rendimiento volumétrico que relaciona el caudal teórico con el caudal real, este último comúnmente se obtiene por medio de pruebas experimentales, midiendo la cantidad de flujo que puede desplazar el dispositivo por unidad de tiempo [12].

$$\eta_v = \frac{Q_{real}}{Q_{teórico}} \quad (3)$$

El rendimiento de las bombas peristálticas se ve afectado por compresión de la manguera. Una compresión baja puede provocar un retroceso o fugas en la salida, mientras que una compresión alta puede reducir la vida útil de la manguera flexible. En consecuencia, se debe buscar una compresión adecuada. El término oclusión se utiliza para definir el espacio mínimo en la bomba en función de la

flexibilidad del tubo [13]. Para diseñar correctamente la bomba, el espacio se puede calcular en función del espesor del tubo (t) y la oclusión esperada del tubo (o_{et}) descrita en la ecuación 4.

$$Oclusión = \left(\frac{2t - o_{et}}{2t} \right) \times 100 \quad (4)$$

- t : Espesor de la pared del tubo (mm)
- o_{et} : Oclusión esperada (mm)

Resolviendo la ecuación 4, se considerando una manguera de diámetro interno de 2 mm y diámetro externo de 5 mm, con una oclusión esperada (o_{et}) de 2.8 mm, dando un porcentaje de 20 % de oclusión cuyo valor es adecuado para evitar retrocesos del fluido.

La Figura 2 muestra el CAD del dispositivo propuesto el cual se usó para realizar una simulación CFD con la paquetería de Solidworks® Flow Simulation con la finalidad identificar las velocidades generadas en el interior del tubo flexible.

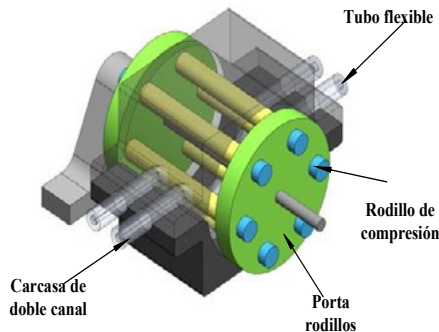


Figura 2. Bomba peristáltica bicanal de seis rodillos.

2.3 Simulación CFD

La simulación CFD permite calcular numéricamente el comportamiento del flujo en el interior de la manguera flexible del dispositivo, dicho análisis fue realizado con la paquetería de Flow Simulation de Solidworks®, la cual comienza con la definición del dominio computación tomando

como referencia solo las partes a las que se va a someter al análisis. Es importante hacer énfasis que en la simulación numérica no se considera el movimiento de los rodillos y que la compresión del tubo flexible por parte de los rodillos es en estado estacionario, es decir, que fungen como obstrucción del flujo a lo largo de la longitud de la manguera. Posteriormente se agregan las condiciones de frontera en la entrada como en la salida de la manguera flexible, seguida de las propiedades del fluido como la densidad y las condiciones fronteras en la entrada como en la salida de la tubería. El tamaño del elemento en la malla se tomó considerando la abertura de menor dimensión dentro del dominio computación, es decir, el diámetro interno de la manguera flexible de 0.002 m, la Figura 3 muestra el diagrama de proceso para la simulación CFD.

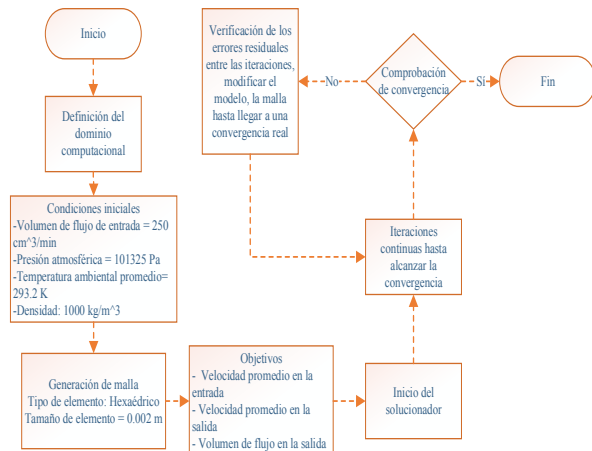


Figura 3. Diagrama de proceso para simulación CFD

3. Resultados y discusión

De los resultados obtenidos de la simulación numérica se puede apreciar que el diseño propuesto permite mantener una velocidad del flujo estable a lo largo de la manguera flexible alcanzado un valor promedio de 1.4 m/s, el cual es similar al calculado, sin embargo, en las secciones donde hubo una reducción de la

sección transversal de la manguera debido a la obstrucción de los rodillos se alcanzaron velocidades máximas de 3.7 m/s . La Figura 4 muestra la distribución de velocidades en la manguera flexible.

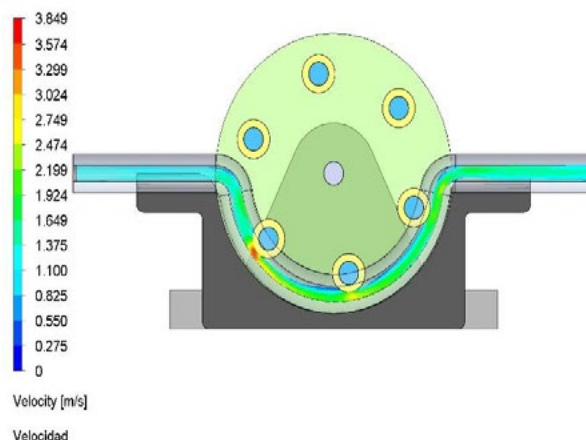


Figura 4. Distribución de velocidad en simulación CFD

Por otro lado, para poder validar que los resultados obtenidos de la simulación eran correctos, se realizaron cinco análisis modificando el nivel de refinamiento de los elementos del fluido (R) llegando hasta un nivel máximo de 2, mientras que el nivel de refinamiento de los elementos del fluido que se encuentran en contacto con la capa límite (CL) del tubo flexible fue de 3, al hacer un comparativo de estos niveles de refinamiento y trazando un segmento de 17 mm en dirección del flujo a lo largo de la entrada y salida de la manguera flexible se observa que la tendencia de los valores de la presión como de la velocidad se van acercando entre si cuanto mayor es el refinamiento, como lo muestran las gráficas de las Figura 5, 6, 7 y 8.

Las Figuras 5 y 6 muestran el aumento de la presión y la reducción de la velocidad en un segmento trazado en la entrada de la manguera, consecuencia de la reducción de la sección transversal de la manguera debida a la compresión por los rodillos; mientras que las Figuras 7 y 8 muestran una velocidad que va

de 2 m/s a 1.4 m/s a lo largo de un segmento trazado en la salida del cabezal, acompañada de una reducción de la presión.

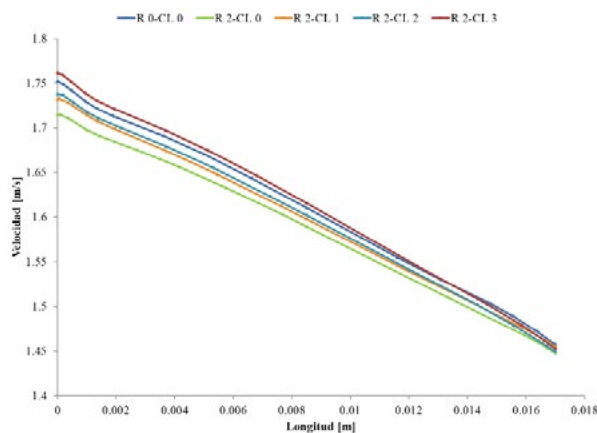


Figura 5. Velocidad de entrada

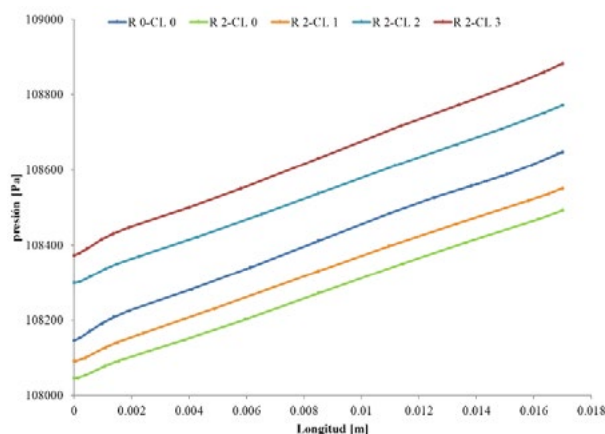


Figura 6. Presión en la entrada

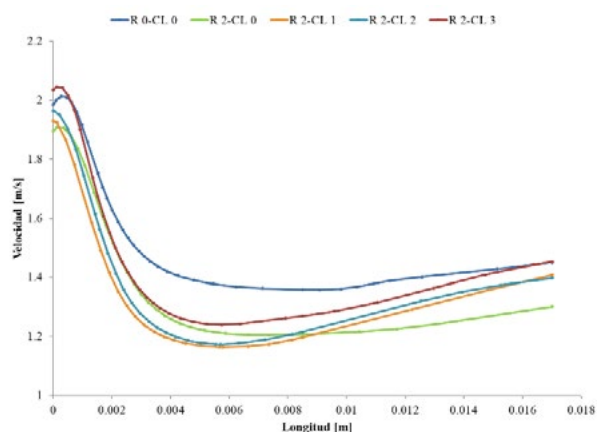


Figura 7. Velocidad en la salida

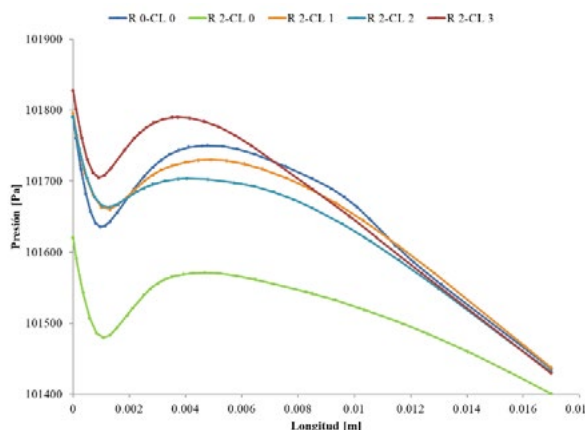


Figura 8. Presión en la salida

4. Conclusiones

Los resultados de esta simulación CFD proporcionan una visión del comportamiento del flujo y la distribución de presión en el diseño de la bomba peristáltica. Se identificaron las zonas de mayor acumulación de presión y reducción de velocidad, que son directamente atribuibles a la compresión de los rodillos.

Si bien el análisis no captura el efecto dinámico completo de la bomba en operación por las limitaciones del software empleado, ofrece una base para el diseño y mejora de la geometría del cabezal giratorio y la disposición de los rodillos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología por los recursos otorgador para la realización de esta investigación.

Referencias

[1] Y. Zhang *et al.*, "From passive to active sorting in microfluidics: A review," *Rev. Adv. Mater.*

Sci., vol. 60, no. 1, pp. 313–324, 2021, doi: 10.1515/rams-2020-0044.

[2] A. P. Iakovlev, A. S. Erofeev, and P. V. Gorelkin, "Novel Pumping Methods for Microfluidic Devices: A Comprehensive Review," *Biosensors*, vol. 12, no. 11. 2022. doi: 10.3390/bios12110956.

[3] S. Gucluer, "A Battery Powered on-Chip Peristaltic Pump for Lab-On-A-Chip Applications," vol. 5, pp. 201–205, 2021.

[4] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Segunda Ed. Segunda Ed. Madrid, España: Ediciones del Castillo, S. A., 1986.

[5] R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos 6/e*. Pearson educación, 2006.

[6] J. Klespitz and L. Kovács, "Peristaltic pumps - A review on working and control possibilities," *SAMI 2014 - IEEE 12th Int. Symp. Appl. Mach. Intell. Informatics, Proc.*, pp. 191–194, 2014, doi: 10.1109/SAMI.2014.6822404.

[7] J. A. Gutiérrez, I. Hernández, and Jose G. O. Cabrera, "Diseño Mecánico Ágil: Nueva propuesta metodológica enfocada a proyectos de desarrollo tecnológico," *Ing. Mecánica Tecnol. y Desarro.*, vol. 6, no. 4, pp. 157–167, 2019.

[8] M. B. Bellovi, R. M. O. Ramos, Centro Nacional de Condiciones de Trabajo, C. M. Paris, and S. A. SEAT, "Análisis modal de fallos y efectos . AMFE Introducción," *English*, pp. 1–10, 2004.

[9] INTERNATIONAL STANDARD ISO 8536-4, "Infusion equipment for medical use." Switzerland, 2019.

[10] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60601-2-24, "Medical electrical equipment – Part 2-24: Particular requirements for the basic safety and essential performance of infusion pumps and controllers." Switzerland, 2012.

[11] S. C. Gasoto and B. Schneider, "Study of the Pulse of Peristaltic Pumps for Use in 3D Extrusion Bioprinting," 2022.

[12] S. Rivero-Urzu, J. C. Paredes-Rojas, S. R. Méndez-García, F. E. Ortiz-Hernández, A. Oropeza-Osornio, and C. R. Torres-Sanmiguel, "3D Low-Cost Equipment for Automated Peritoneal Dialysis Therapy," *Healthc.*, vol. 10, no. 3, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3390/healthcare10030564.

[13] I. Tamadon, V. Simoni, V. Iacovacci, F. Vistoli, L. Ricotti, and A. Mencassi, "Miniaturized peristaltic rotary pump for non-continuous drug dosing*," *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, pp. 5522–5526, 2019, doi: 10.1109/EMBC.2019.8857811.

Redes Neuronales en la automatización del análisis estático sísmico regional para edificaciones de mediana altura

Neural Networks in the automation of regional seismic static analysis for mid-rise buildings

Avila Nieto, Enrique¹; Horta Rangel, Jaime Moisés¹; Pérez Moreno, Luis Francisco¹; Pérez Lara y Hernández, Miguel Ángel¹; Rico García, Enrique¹.

¹*Dirección de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería*

¹*Universidad Autónoma de Querétaro*

Santiago de Querétaro, Querétaro, México

enrique.an.04.95@gmail.com

Palabras clave: EST, Red Neuronal Artificial, Análisis sísmico, OpenSeesPy.

Resumen- El presente trabajo se enfoca en el diseño y entrenamiento de una serie de redes neuronales artificiales para la automatización de los análisis estructurales bajo demanda sísmica. Se propone una metodología que genera modelos con diferentes dimensiones, los cuales son analizados utilizando OpenSeesPy, una librería de código abierto en Python para el diseño estructural. Los desplazamientos laterales obtenidos se comparan con los límites de distorsiones angulares establecidos en la condición de seguridad de vida, según las normas mexicanas. El entrenamiento de las redes neuronales se realiza mediante análisis estáticos utilizando el método de fuerza horizontal equivalente, lo que permite una comparativa con edificaciones de control, a través de su respectivo análisis modal espectral, observando las diferencias entre ambos enfoques. Además, se genera el espectro sísmico transparente regional para la ciudad de Querétaro, y se calcula el coeficiente sísmico modificado y amortiguado para el cálculo de las fuerzas horizontales equivalentes. Todo esto tiene como objetivo desarrollar un método de preanálisis confiable y automatizado, que permita reducir tiempos y la cantidad de iteraciones en análisis estructurales posteriores.

Keywords: EST, Artificial Neural Network, seismic analysis, OpenSeesPy

Abstract- This work focuses on the design and training of a series of artificial neural networks for the automation of structural analyses under seismic demand. A methodology is proposed that generates models with different dimensions, which are analyzed using OpenSeesPy, an open-source Python library for structural design. The obtained lateral displacements are compared with the angular distortion limits established in the life safety condition, according to Mexican standards. The neural networks are trained through static analyses using the equivalent horizontal force method, allowing for a comparison with control buildings through their respective modal spectral analysis, observing the differences between both approaches. Additionally, the regional transparent seismic spectrum for the city of Querétaro is generated, and the modified, damped seismic coefficient is calculated for the computation of equivalent horizontal forces. The goal of this work is to develop a reliable and automated pre-analysis method that reduces time and the number of iterations in subsequent structural analyses.

1. Introducción

El análisis sísmico de una estructura tiene como objetivo convertir los fuertes movimientos del suelo en base a demandas de fuerzas que se aplican en la edificación [1]. Lo anterior toma un papel muy importante al momento de diseñar una estructura, principalmente en un país altamente sísmico como lo es México, motivo por el cual se debe poner especial cuidado sobre cualquier otro efecto o combinación de carga.

En la actualidad hay varios métodos de análisis, sin embargo, el simplificado estático destaca sobre los demás por su antigüedad y por estar presente en la mayoría de las normativas del mundo. En dicho método se calculan fuerzas distribuidas por nivel lateralmente para simular los efectos del sismo sobre la edificación [2], tal como se observa en la Fig. 1.

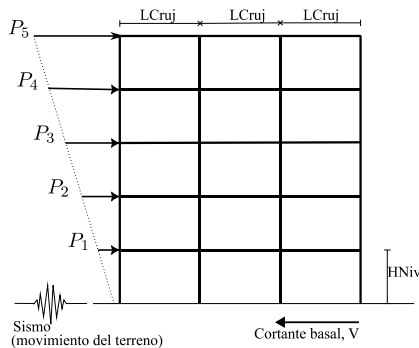


Figura 1. Representación esquemática del análisis simplificado estático ante un evento sísmico en dirección X-X.

En la actualidad, no se ha abordado un método de prediseño o preanálisis sísmico de edificaciones en alguna normativa o manual en México. Esto es crucial para evaluar el comportamiento inicial de la estructura y reducir la cantidad de tiempo en los análisis posteriores. La perspectiva de la filosofía de diseño a nivel mundial está centrada en el desempeño sísmico, siguiendo lo establecido en manuales como el FEMA 440 [3]. No obstante, la metodología tradicional de diseño

basada en fuerzas merece consideración adicional en el área del prediseño. Realizar dos o incluso tres análisis distintos implica una mayor inversión de tiempo, especialmente si se desea un modelado detallado. Además, las metodologías de diseño estructural son iterativas, lo que justifica la necesidad de automatizarlas [4].

En los últimos años, ha habido un interés creciente en la utilización de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) en el campo de la Ingeniería Civil, específicamente el área de las estructuras, las cuales se han utilizado para la predicción de la respuesta sísmica de edificaciones, diseño y optimización de las mismas, en resumen automatizar los análisis para acelerar procesos [5].

Una Red Neuronal, más específicamente un perceptrón multicapa (PM), puede describirse como una función $f: R^n \rightarrow R^m$, que convierte un vector de entradas $x = (x_1, x_1, \dots, x_1)$ en un vector de salidas $y = (y_1, y_1, \dots, y_1)$. Una RNA es una función inspirada en las neuronas biológicas y sus conexiones sinápticas [6]. La Fig. 2 muestra una representación gráfica de un PM.

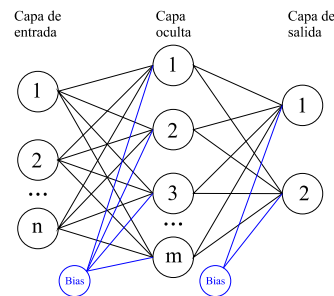


Figura 2. Esquema de la arquitectura de una Red Neuronal (RNA), del tipo Perceptrón Multicapa (PM).

En el campo de la automatización del análisis sísmico se han utilizado en varios trabajos las Redes Neuronales, por ejemplo, Caglar *et al.* [7] propusieron cuatro modelos de RNA para estimar la respuesta dinámica de edificios de concreto reforzado, utilizando análisis de elementos finitos, sin embargo, no

se obtienen los esfuerzos internos por elemento o grupos de elementos para el posterior diseño estructural.

Arcila *et al.* [8] desarrollaron seis redes neuronales para el diseño de vigas y columnas en edificios de concreto reforzado, enfocándose en estructuras de 5 niveles, las más comunes en Colombia y en la mayoría de países, incluyendo México. Las redes se entrenaron basándose en el espectro sísmico de Medellín, obteniendo errores cuadráticos medios muy cercanos a cero. Sin embargo, se emplearon únicamente las derivas por piso como datos de entrada, lo que implica la necesidad de conocer previamente el valor óptimo de dicha deriva.

Es de vital importancia fundamentar una metodología para identificar los elementos mecánicos principales de la estructura ante una combinación de cargas accidentales, enfocándose en las edificaciones denominadas de mediana altura, clasificadas por el manual de diseño de obras civiles por sismo de la CFE (MDOC-CFE) como B1, mayores a 13m y menores a 30m [9].

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar y entrenar una RNA que permita obtener fuerzas cortantes, momentos y fuerzas axiales de edificaciones de mediana altura, específicamente abordando las de 5 niveles y 3 crujías, que según algunos estudios, es una de las configuraciones geométricas más comunes [10], considerando el espectro de diseño de la ciudad de Querétaro, Qro., México, además de comparar los resultados con un análisis modal espectral de una edificación de control (altura $h_{Niv}=3m$ y longitud de crujía $L_{Cruj}=5m$).

2. Metodología

A continuación, se describe la metodología empleada en esta investigación.

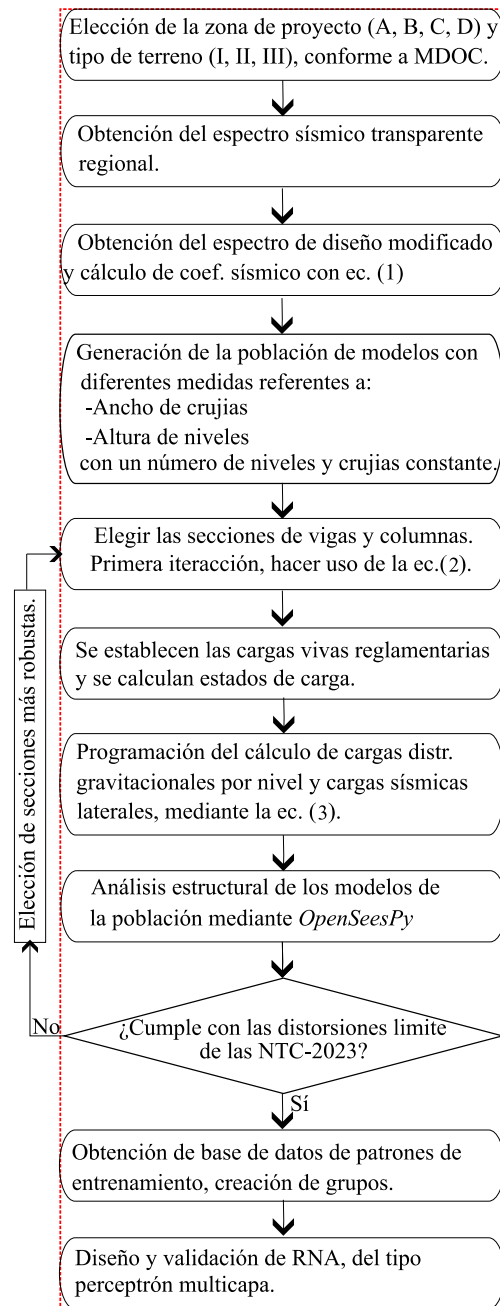


Figura 3. Diagrama de flujo con los pasos a seguir para la elaboración de 3 Redes Neuronales para la predicción de elementos mecánicos de vigas y columnas.

En la Fig. 3, se observa en general el proceso, en donde se destaca el objetivo final que es la construcción de 3 redes neuronales artificiales a través de la generación de patrones de entrenamiento.

2.1 Obtención del espectro sísmico transparente regional

El primer paso en el proceso fue la obtención del espectro sísmico transparente regional, el cual fue crucial para proporcionar una representación precisa y detallada de la demanda sísmica en la zona de estudio, en este caso, la ciudad de Querétaro, México. Este espectro permite identificar las características sísmicas locales y su impacto en las estructuras. Para calcular dicho espectro se utiliza la Fig. 4, la cual fue extraída del Manual de Diseño de Obras Civiles para Sismo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [9].

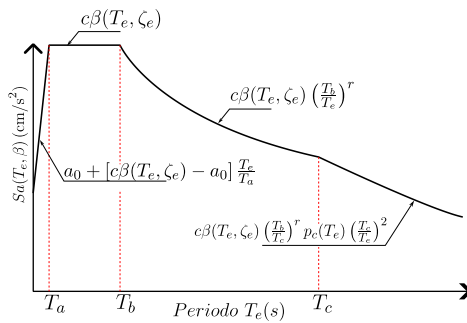


Figura 4. Espectro de diseño sísmico general, basado en el MDOC-CFE.

Para complementar este análisis, se puede hacer uso del programa Prodisis de la CFE que permite obtener espectros de diseño sísmico para diferentes zonas del país. Este programa es una herramienta importante para diseñar edificaciones bajo normativa sísmica, ya que ofrece parámetros clave como la aceleración máxima del terreno a_0 (en cm/s^2) y la aceleración máxima espectral C (en cm/s^2).

Querétaro se encuentra en una zona sísmica “B”, lo que significa que la intensidad y frecuencia sísmica no es muy alta, además se consideró un terreno tipo II, que son formados por suelos que presentan amplificaciones dinámicas intermedias.

2.2 Cálculo del coeficiente sísmico

Fue indispensable calcular el coeficiente sísmico regional característico de la estructura, para poder calcular

posteriormente las fuerzas sísmicas laterales equivalentes que actúan sobre ella. Se empleó un espectro de diseño anteriormente generado y la Ec. (1).

$$c = \frac{a\langle T_a, \beta \rangle}{Q'\langle T_a, Q \rangle R\langle T_a, R_0 \rangle \rho} \quad (1)$$

Donde $a\langle T_a, \beta \rangle$ es la ordenada espectral o pseudoaceleración normalizada, que corresponde al periodo T_a , $Q'\langle T_a, Q \rangle$ es el factor reductor por ductilidad, el cual depende del tipo de estructura en cuestión, $R\langle T_a, R_0 \rangle$ que es el factor reductor por sobrerresistencia y por último ρ que es el factor por redundancia, todos los anteriores valores fueron obtenidos mediante las tablas correspondientes del MDOC-CFE.

2.3 Generación de la población de modelos de edificaciones

Se generaron 60 modelos distintos de edificaciones, manteniendo constante el número de niveles en 5 y la cantidad de crujías en 3 para todos, por lo cual, los intervalos de características geométricas variables se pueden observar en la Tabla 1, los valores de la carga distribuida fueron calculados y programados conforme la Fig. 6 y valores de reglamento NTC-2023 [11].

Tabla 1. Rangos de las variables independientes para la generación de modelos.

	Altura de niveles (m)	Ancho de crujías (m)	Carga distribuida (kg/m)
Valor mínimo	2	3	875
Valor máximo	4	7	1500

Las variaciones de la altura y el ancho de las crujías se realizaron siguiendo una distribución normal, para el caso de la altura de niveles se consideró una media con valor de 3m y una varianza de 1m, y en cuanto al ancho de las crujías se consideró una media con valor de 5m con varianza de 2m [10]. La división de los datos se realizó tal como se muestra en la

Fig. 5, 48 datos fueron utilizados para el entrenamiento de la RNA, posteriormente 8 modelos, generados con la misma metodología sirvieron para validar y finalmente 12 modelos que se realizaron en el programa ETABS 19 fungieron como datos de prueba final.

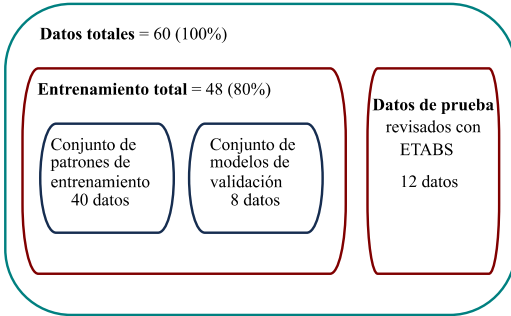


Figura 5. División de datos de los modelos generados.

2.4 Elección de vigas y columnas inicial

Para la obtención inicial tanto de las vigas y columnas se utilizó la Ec. (2), propuesta por Gerda Corsi [12], en la que en base a la longitud del claro se obtiene el peralte para vigas “W” ó “IR”.

$$\frac{L}{24} < d \leq \frac{L}{28} \quad (2)$$

Donde L , es la longitud del claro y d el peralte efectivo. Como catálogo de referencia de secciones estructurales se utilizó el Manual del Instituto Mexicano de la Construcción en Acero (IMCA) [13], únicamente se utilizaron perfiles IR, tanto para vigas como para las columnas. El material es un acero estructural grado A-500B con un esfuerzo de fluencia de 3,235 kg/cm² y un esfuerzo último de 4,080 kg/cm², el cuál es el tipo de acero más común para este tipo de perfiles.

2.5 Estados de carga

Los sistemas de entrepiso y azotea contemplados para este trabajo son a base losa acero calibre 22, considerando una capa de compresión de 6cm. Con estos datos el fabricante, específicamente “Grupo Azero” [14], proporciona un peso propio de 236 kg/m². Para la parte de carga viva, se utilizaron los valores recomendados por la norma técnica

complementaria sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones, teniendo para edificios de oficinas, despachos y laboratorios una carga viva máxima (W_m) de 250 kg/m² y una carga viva instantánea (W_a) de 180 kg/m². La obtención de las áreas tributarias se hizo considerando que el marco de análisis estuviera a la mitad y con tableros cuadrados trabajando en 2 direcciones, tal como se aprecia en la Fig. 6.

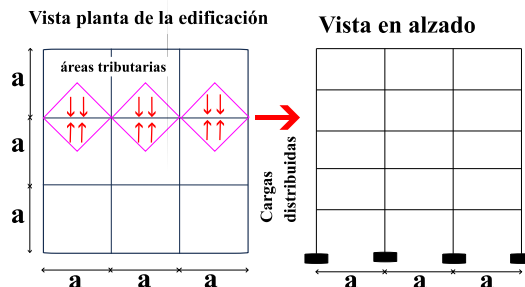


Figura 6. Vista planta de las edificaciones modelo y áreas tributarias.

Los modelos de edificaciones son regulares en todas las vistas, dando la oportunidad de programar la obtención de cargas distribuidas por nivel de piso.

2.6 Obtención de las cargas sísmicas laterales.

Se calcularon 5 fuerzas laterales, una por cada nivel de las edificaciones, utilizando la Ec. (3), del MDOC-CFE, previamente se determinaron las cargas por piso esto en base a los estados de carga anteriormente calculados, los cuales son indispensables para la determinación de dichas fuerzas.

$$P_n = W_n h'_n \frac{\sum_{n=1}^{Ne} W_n}{\sum_{n=1}^{Ne} W_n h'_n} \frac{a}{Q'R\rho} \quad (3)$$

Donde W_n es el peso total del entrepiso n , y h'_n , es la altura nivel n , correspondiente. $\sum_{n=1}^{Ne} W_n$ es la suma total de todos los pisos de la edificación y $\sum_{n=1}^{Ne} W_n h'_n$ es la sumatoria de multiplicar capa peso de nivel por su correspondiente altura, por último, $\frac{a}{Q'R\rho}$ es igual al coeficiente sísmico regional característico ya calculado.

2.7 Análisis estructural de los modelos mediante OpenSeesPy

OpenSeesPy es una librería de código abierto ampliamente utilizada en la comunidad de ingeniería estructural debido a su capacidad para realizar análisis avanzados de estructuras bajo diversas condiciones de carga, como sismos y cargas gravitacionales [15]. Se utilizó la versión 3.12.5 de Python sobre la que se instaló la versión más actual de OpenSeesPy correspondiente a la versión 3.7.0.4., las cuales son las versiones compatibles estables más actuales, esto para la generación de los patrones de entrenamiento.

2.8 Revisión de las distorsiones límite de acuerdo con las NTC-2023.

En este trabajo, se verifica que los *drifts* o distorsiones angulares de cada piso no superen los límites establecidos en el reglamento para la "seguridad de vida" (Y_{SV}). Estos límites específicos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Distorsiones límite para estructuras de acero.

Ductilidad	Q	Y_{SV}	Y_{OI}
Alta	4.0	0.030	0.0075
Media	3.0	0.020	0.0075
Baja	2.0	0.015	0.0075

Cumplir con el límite de "ocupación inmediata" (Y_{OI}) significa que la estructura no presenta deformaciones permanentes, lo cual, aunque garantiza seguridad, suele ser económicamente inviable.

2.9 Diseño de la Red Neuronal Artificial

El diseño de la arquitectura de una red neuronal se realiza mediante un enfoque iterativo de prueba y ajuste [16], en el cual se exploran diversas configuraciones de RNA para identificar aquella que minimice el Error Cuadrático Medio (ECM), como se define en la Ec. (4). El ECM es una métrica clave para evaluar el rendimiento de las redes neuronales artificiales.

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

Donde n es el número total de muestras en el conjunto de datos, y_i representa el valor real de la i -ésima muestra, y $\hat{y}_i$ es el valor predicho por la red neuronal artificial (RNA). Las muestras obtenidas fueron normalizadas de -1 a 1, por lo que el ECM también está normalizado.

Los parámetros finales utilizados después del proceso iterativo en la creación de la arquitectura de las tres redes en RStudio (versión 2024.04.2) con la librería neuralnet fueron los siguientes: se empleó una arquitectura 5-9-7-1, con una función de activación tangente hiperbólica. El algoritmo de optimización utilizado fue el Descenso de Gradiente Estocástico (DGE), con un número máximo de iteraciones de 3,000, una tasa de aprendizaje de 0.01 y tres repeticiones del entrenamiento.

3. Resultados y discusión

Se muestran los resultados obtenidos del presente trabajo, iniciando con el espectro sísmico transparente regional y modificado para la ciudad de Querétaro, posteriormente se presenta la validación del método de entrenamiento, y finalmente se presentan las 3 redes neuronales, una para el cálculo de la fuerza axial, otra para la predicción de fuerzas cortantes y la última para el cálculo de momentos.

3.1 Espectro sísmico regional para la ciudad de Querétaro.

El espectro de diseño transparente regional, representado por la línea negra de la Fig. 7, tiene un pico alrededor de los 0.2 segundos, que es T_a , donde la aceleración espectral alcanza un valor cercano a 0.74 g, conocida dicha zona como la meseta. El coeficiente sísmico calculado es igual 0.40477 g, relacionado con la meseta del espectro de diseño modificado (línea verde).

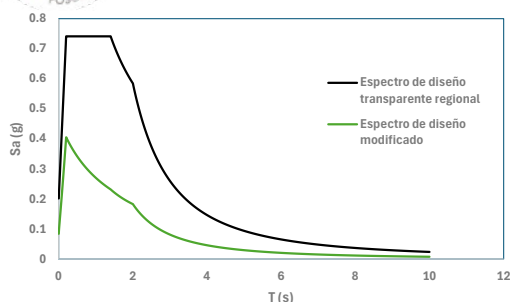


Figura 7. Espectro de diseño transparente regional considerando un terreno tipo II y espectro modificado amortiguado.

3.2 Comparativa de análisis sísmicos en edificación de control.

La validación del método de entrenamiento con OpenSeesPy se realizó a través de un análisis sísmico estático simplificado de la estructura de control en ETABS 19. Además, se compararon los resultados de los métodos estáticos con los obtenidos mediante un análisis modal espectral, que ofrece una evaluación más completa. Las distorsiones angulares resultantes se presentan en la Fig. 8, utilizando un perfil W14x30 para las columnas y W12x26 para las vigas.

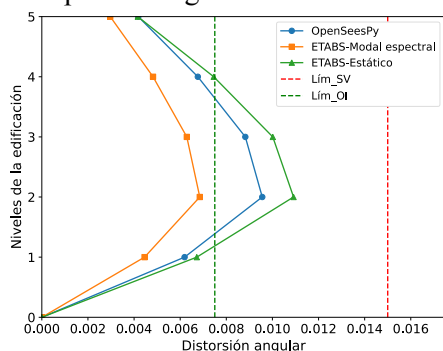


Figura 8. Comparativa entre resultados de distorsiones angulares de la edificación de control usando 3 métodos de análisis.

Se observa que las diferencias entre los análisis estáticos no son significativas y resultan más conservadores, ya que presentan mayores distorsiones angulares en comparación con el análisis modal espectral. Esto indica que los métodos estáticos favorecen la seguridad estructural en edificaciones con características similares a las analizadas en este trabajo.

3.3 Redes Neuronales artificiales generadas

Como resultado de todo el proceso de generación de patrones de entrenamiento se logró diseñar 3 Redes Neuronales Artificiales (Figs. 9, 10). Como métrica para determinar

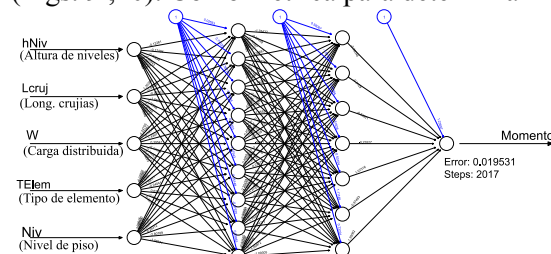


Figura 9. Red Neuronal Artificial para predecir las fuerzas axiales máximas por nivel y tipo de elemento.

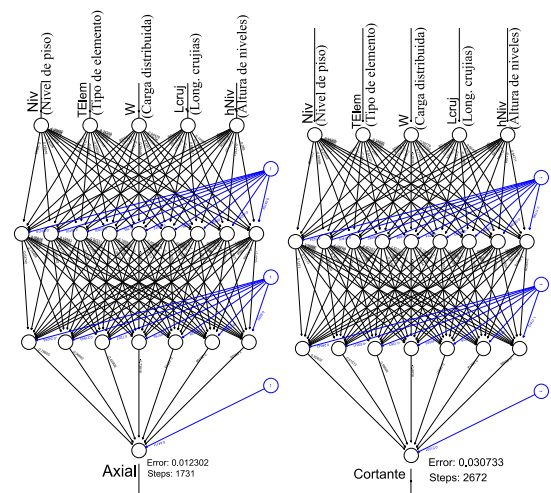


Figura 10. Redes Neuronales Artificiales para predecir las fuerzas axiales y esfuerzo cortante máximos por nivel y tipo de elemento.

el nivel de predicción de las redes se utilizó el ECM para diferentes arquitecturas. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Evaluación de diferentes Redes Neuronales mediante el ECM.

Arquitectura	ECM (Axial)	ECM (Cortante)	ECM (Momento)
RNA			
5-5-1	0.128	0.147	0.320
5-9-7-1	0.0123	0.0307	0.0195
5-9-10-9-1	0.0171	0.0405	0.022

La arquitectura 5-9-7-1 presenta el menor ECM en las redes neuronales evaluadas. Estas redes solo son predictivas cuando las características sísmicas de la zona

del proyecto sean similares a las de Querétaro (Zona B, terreno tipo II) y se ajusten a los rangos de la Tabla 1.

Conclusiones

Por último, partiendo de los resultados obtenidos se establecen las siguientes conclusiones:

- Los elementos mecánicos de una estructura regular sometida a sismo se pueden predecir mediante una RNA del tipo perceptrón multicapa con una arquitectura 5-9-7-1, con errores de alrededor del 3% y considerando zona sísmica B y terreno II.
- Es necesario utilizar funciones de activación en la RNA que tengan un dominio tanto positivo y negativo, como por ejemplo una tangente hiperbólica.
- El análisis simplificado estático para estructuras de mediana altura regulares es un método en la mayoría de los casos mucho más conservador que el análisis modal espectral.
- Es posible entrenar una RNA mediante la metodología tradicional de diseño para poder realizar preanálisis, agilizar procesos y realizar menos iteraciones.
- El periodo fundamental de vibrar de una edificación de 5 niveles y 3 crujías de acero es aproximadamente 0.91seg, con una participación de masa de más del 80%.

Agradecimientos

Agradezco al Conahcyt, por el apoyo para continuar con mis estudios de posgrado.

Referencias

- [1] J. Jia, "Seismic Analysis and Response of Structures", en *Modern Earthquake Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, pp. 471–545. doi: 10.1007/978-3-642-31854-2_15.
- [2] N. Bourahla, "Equivalent Static Analysis of Structures Subjected to Seismic Actions", en *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, M. Beer, I. A. Kougioumtzoglou, E. Patelli, y I. S.-K. Au, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 1–13. doi: 10.1007/978-3-642-36197-5_169-2.

- [3] M. Mohammadi, S. Gholizadeh, y Vahid Aligholizadeh, "Neural network-based Reliability assessment of optimally seismic designed moment frame", *Int. J. Optim. Civ. Eng.*, vol. 4, núm. 1, pp. 1–26, 2014.
- [4] J. de-Miguel-Rodríguez *et al.*, "Fast Seismic Assessment of Built Urban Areas with the Accuracy of Mechanical Methods Using a Feedforward Neural Network", *Sustainability*, vol. 14, núm. 9, p. 5274, abr. 2022, doi: 10.3390/su14095274.
- [5] F. Valderrama, "Importancia de las redes neuronales artificiales en la ingeniería civil: Una revisión sistemática de la literatura", *ITECKNE Innov. E Investig. En Ing.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.15332/iteckne>.
- [6] C. H. Menacho Chiok, "Modelos de regresión lineal con redes neuronales", *An. Científicos*, vol. 75, núm. 2, p. 253, 2014, doi: 10.21704/ac.v75i2.961.
- [7] N. Caglar, M. Elmas, Z. D. Yaman, y M. Saribiyik, "Neural networks in 3-dimensional dynamic analysis of reinforced concrete buildings", *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, núm. 5, pp. 788–800, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.029.
- [8] Jorge Arcila Zea, C. Alberto, y J. Enrique, "Optimización de secciones de vigas y columnas para el cumplimiento de la deriva en edificaciones de concreto reforzado mediante Redes Neuronales Artificiales", *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, núm. 70, pp. 34–44, 2014.
- [9] Comisión Federal de Electricidad, *Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Sismo*. México, 2015.
- [10] A. F. C. Dya y A. W. C. Oretaa, "Seismic Vulnerability Assessment of Soft Story Irregular Buildings Using Pushover Analysis", *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 925–932, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.103.
- [11] Gobierno de la Ciudad de México, *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. México, 2023.
- [12] C. Cházaro, *Diseño básico de estructuras de acero*, Primera edición. México: Gerdau Corsa, 2019.
- [13] IMCA, *Manual de Construcción en Acero*, Sexta edición. México: Limusa, 2022.
- [14] Grupo Azero, *Manual de instalación losacero*. México, 2016.
- [15] M. Zhu, F. McKenna, y M. H. Scott, "OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework", *SoftwareX*, vol. 7, pp. 6–11, ene. 2018, doi: 10.1016/j.softx.2017.10.009.
- [16] E. Herrera-Daza, A. M. Ramos-Cañón, y J. A. García-Leal, "Redes neuronales artificiales para representar la atenuación de la intensidad sísmica", *Ing. Univ.*, vol. 17, pp. 277–292, dic. 2013.

Modelado y Control de un Convertidor Puente H para Motores de Corriente Continua de Imanes Permanentes.

Modeling and Control of a H-Bridge Converter for Permanent Magnet Direct Current Motor

Molina-Santana, Ernesto¹ Romero-Maldonado, José Emmanuel²

División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México¹.

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México².

al2223804048@gmail.com

Palabras clave: Modelado, Motor de Corriente Directa de Imanes Permanentes, Convertidor de Potencia, Teoría Clásica de Control, Simscape, Función de Transferencia.

Resumen- Los motores de corriente directa son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones debido a sus características operativas y la simplicidad de su regulación en comparación con otros tipos de máquinas rotativas. En este trabajo se modela un motor de corriente directa de imanes permanentes accionado por un convertidor de potencia tipo puente H completo. El modelado se realiza considerando los circuitos equivalentes que representan cada uno de los componentes del sistema mecatrónico. Tras el proceso de modelado, se diseña un esquema de control basado en la teoría clásica del control, obteniendo un esquema sencillo y eficaz que asegura márgenes de robustez, permitiendo regular la operación del sistema incluso ante perturbaciones externas y variaciones en la referencia aplicada.

Keywords: Modeling, Permanent Magnet Direct Current Motor, Power Converter, Classic Control Theory, Simscape, Transfer Function.

Abstract- Direct current motors are widely used in various applications due to their operational characteristics and the simplicity of their regulation compared to other types of rotating machines. In this work, a permanent magnet direct current motor driven by a full H-bridge power converter is modeled. The modeling process is carried out considering the equivalent circuits representing each of the components of this kind of mechatronic system. After the modeling process, a control scheme is designed based on classical control theory, resulting in a simple and effective scheme that ensures robustness margins, allowing for the regulation of the operation of this system even in the presence of external disturbances and reference variations.

1. Introducción.

Los motores de corriente directa (CD) [1] son máquinas eléctricas ampliamente utilizadas como actuadores en diversas aplicaciones. Su popularidad se debe a varias ventajas operativas, como su alto par de arranque y aceleración, además de un amplio rango de velocidad [2]. Estos motores han sido

empleados en aplicaciones como el control de grúas tipo torre, la propulsión de vehículos eléctricos y en la industria textil.

Una ventaja clave de los motores CD es que requieren mínimos ajustes para regular su operación [2]. Los sistemas de accionamiento modernos para estos motores están basados en dispositivos de electrónica de potencia [3]. Ardhenta y Subroto en [4] proponen el uso de

un convertidor DC-DC tipo buck para regular la velocidad de un motor CD utilizando un esquema basado en retroalimentación en conjunto con un observador de estado.

Liceaga-Castro et al. en [5] utilizan un puente H completo para regular la velocidad de un motor de corriente continua, permitiendo giros en ambos sentidos y operando en aceleración y frenado. Sin embargo, no consideran el modelado del convertidor de potencia.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo detallado de un sistema mecatrónico que integra un convertidor de potencia de puente H completo y un motor de CD de imanes permanentes, para diseñar un esquema de control que regule su funcionamiento según un perfil de velocidad deseado.

La sintonización de los componentes de los reguladores propuestos se realizará mediante procedimientos basados en la teoría clásica del control, utilizando análisis de frecuencia y funciones de transferencia. La validación de los modelos propuestos se realizará considerando los resultados obtenidos de simulaciones con funciones de la biblioteca Simscape, seleccionada por su capacidad para describir el comportamiento dinámico de diversos sistemas mecatrónicos, como se ilustra en [6].

Entre los aportes de este trabajo se destacan los siguientes:

1. Obtención y validación de modelos analíticos para describir la dinámica de un convertidor de potencia tipo puente H completo acoplado a un motor CD de imanes permanentes.
2. Diseño de un esquema de control utilizando la teoría clásica para regular la operación del sistema mecatrónico analizado.

La organización del presente trabajo es la siguiente: en la **Introducción** se expone la

motivación del estudio y los aportes principales. En la sección de **Materiales y Métodos** se describe el sistema mecatrónico a modelar en cuanto a los elementos que lo compone. La sección de **Resultados** aborda el modelado del sistema, el dimensionamiento de los componentes del convertidor de potencia, la validación de los modelos y la sintonización del controlador. En la sección de **Discusión** se analizan los resultados de la implementación del esquema de regulación. Finalmente, se presentan las **Conclusiones**.

2. Materiales y Métodos.

A continuación, en la Figura 1 se muestra el sistema mecatrónico a modelar y controlar. Este Sistema está compuesto por dos subsistemas principales: un motor de corriente continua con imanes permanentes y un puente H completo, que actúa como el actuador del motor.

El convertidor de potencia consta de dos componentes esenciales, uno de los cuales es el bloque de conmutadores. Este bloque contiene los dispositivos semiconductores encargados de controlar el nivel de tensión aplicado entre los terminales de la armadura del motor.

Los semiconductores utilizados son conmutadores completamente controlados, como IGBTs o MOSFETs, seleccionados según los niveles de potencia requeridos y la frecuencia de conmutación. Estos conmutadores se regulan mediante pulsos de alta frecuencia que se corresponden a las variables s_1 y s_2 . Cabe destacar que $\bar{s}_1$ y $\bar{s}_2$ son los complementos de las variables antes mencionadas, por lo que cumplen con las siguientes condiciones:

$$\bar{s}_1 = 1 - s_1 \quad \bar{s}_2 = 1 - s_2 \quad (1)$$

El cumplimiento de las condiciones representadas por la expresión 1 es obligatorio en todo momento puesto que así se evita que se produzca un corto circuito en la fuente voltaje V_s . V_t se corresponde a la tensión presente a la salida del puente H. L_r y C_r son los elementos que componen al filtro de

rizado. V_a e i_a son el voltaje y la corriente de armadura del motor CD.

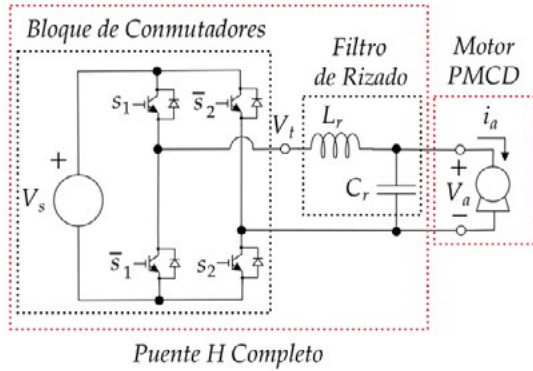


Fig. 1: Representación del sistema mecatrónico analizado.

El otro componente del convertidor es el filtro de rizado, cuya función es la de reducir la magnitud de los armónicos generados por las conmutaciones que se producen en el interior del bloque de conmutación. De esta manera se asegura que el voltaje suministrado al motor esté libre de componentes de frecuencia no deseadas que puedan afectar su rendimiento.

Este filtro de rizado es energizado por la tensión denotada como V_t . En este tipo de aplicaciones, es común emplear una topología LC para el filtro de rizado, tal y como se presentó en la Figura 1.

El otro subsistema del sistema analizado es el motor CD, compuesto por dos partes: el subsistema eléctrico y el subsistema mecánico. En la Figura 2 se muestra un circuito eléctrico equivalente que representa el comportamiento de un motor CD de imanes permanentes.

En este circuito equivalente L_a representa la inductancia de armadura del motor CD, R_a es la resistencia de armadura. E_a es la fuente contraelectromotriz asociada al efecto que produce el sub-sistema mecánico sobre el eléctrico. En este caso k_e se corresponde con la constante contra-electromotriz del motor y ω es la velocidad a la cual gira el eje del motor CD [1].

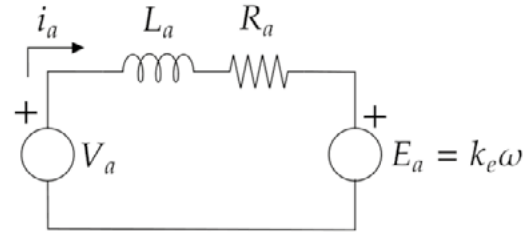


Fig. 2: Circuito equivalente del motor de corriente directa.

3. Resultados

Se procede a modelar cada uno de los subsistemas que constituyen el sistema mecatrónico en estudio, utilizando circuitos eléctricos equivalentes. Tras la validación de los modelos, se propone y sintoniza el esquema de control que regulará la operación del motor CD.

Se procede a modelar cada uno de los subsistemas que constituyen el sistema mecatrónico en estudio, utilizando circuitos eléctricos equivalentes. Tras la validación de los modelos, se propone y sintoniza el esquema de control que regulará la operación del motor CD.

3.1. Modelado del Motor de Corriente Directa.

Las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del motor de corriente directa están dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} L_a \frac{d}{dt} i_a &= V_a - R_a i_a - k_e \omega \\ J \frac{d}{dt} \omega &= \tau_e - \tau_L - b \omega \end{aligned} \quad (2)$$

donde b es la constante de amortiguamiento del subsistema mecánico, ω representa la velocidad angular del eje del motor, J es la inercia asociada a dicho eje, τ_L es el torque de la carga acoplada, y τ_e corresponde al torque eléctrico. El torque eléctrico se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_e = k_i i_a \quad (3)$$

donde k_i es la constante de torque asociada con la operación del motor. La representación en espacio de estado de esta dinámica está asociada a la siguiente ecuación matricial:

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{u}_M \quad (4)$$

donde el vector de estado es $\mathbf{x}_M = [i_a \ \omega]^T$, el vector de entrada es $\mathbf{u}_M = [V_a \ \tau_L]^T$, y la matriz de estado ($\mathbf{A}_M$) y de entrada ($\mathbf{B}_M$) están dadas por las presentadas a continuación:

$$\mathbf{A}_M = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_e}{L_a} \\ \frac{k_i}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix} \text{ y } \mathbf{B}_M = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}$$

A partir de esta representación en espacio de estado, es posible derivar las funciones de transferencia $G_{M1}(s) = \frac{i_a(s)}{V_a(s)}$ y $G_{M2}(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)}$, utilizando la siguiente expresión matricial bien conocida de la teoría clásica del control:

$$G_M(s) = \mathbf{C}_M (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_M)^{-1} \mathbf{B}_M \quad (5)$$

siendo $\mathbf{C}_M$ la matriz de salida que se corresponde con la función de transferencia que se desea obtener. Por tanto:

$$G_{M1}(s) = \frac{k_i}{D(s)} \quad G_{M2}(s) = \frac{Js + b}{D(s)} \quad (6)$$

donde $D(s) = J L_a s^2 + (J R_a + L_a b) s + R_a b + k_e k_i$. Para obtener estas funciones de transferencia, se asumió que el torque de carga es nulo ($\tau_L = 0$). Por tanto, estas funciones de transferencia representan el efecto directo del voltaje aplicado en los terminales de la armadura sobre las variables de estado que caracterizan a la máquina eléctrica.

La función de transferencia $G_{M1}(s)$ describe el comportamiento de la velocidad angular del rotor, siendo fundamental para el diseño del controlador encargado de regular la velocidad de rotación del motor durante su operación. La función de transferencia $G_{M2}(s)$ se utilizará

para emular el comportamiento en estado estacionario del motor de corriente continua.

Esta emulación resulta conveniente al momento de analizar el desempeño del convertidor una vez acoplado al motor que se desea regular. De esta manera, se propone caracterizar el motor CD como un elemento resistivo puro, representado por la siguiente expresión:

$$R_{ss} = \left. \frac{1}{G_{M2}(s)} \right|_{s=0} = R_a + \frac{k_e k_i}{b} \quad (7)$$

Esta aproximación es válida al suponer que el motor CD está accionado por una tensión de naturaleza continua cuando el sistema opera en régimen de estado estacionario.

3.2. Modelado del Convertidor de Puente H Completo.

El modelado del convertidor de potencia se divide en dos partes. La primera se enfoca en la sección del filtro de rizado, asumiendo que el sistema opera en régimen estacionario y que las señales de alta frecuencia generadas por la conmutación son despreciables. En la Figura 3 se presenta el circuito equivalente que representa el conjunto convertidor-motor bajo estas condiciones.

Las ecuaciones diferenciales que describe la dinámica de este circuito equivalente son las que se presentan mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} L_r \frac{d}{dt} i_r &= V_t - V_a \\ C_r \frac{d}{dt} V_a &= i_r - \frac{1}{R_{ss}} V_a \end{aligned} \quad (8)$$

Considerando las ecuaciones diferenciales previamente presentadas, es necesario definir el comportamiento de la tensión de salida del convertidor en función de la tensión V_s y de las señales s_1 y s_2 , las cuales regulan el estado de operación de los conmutadores que componen el bloque de conmutación. Para obtener esta expresión, se analiza el circuito mostrado en la Figura 4.

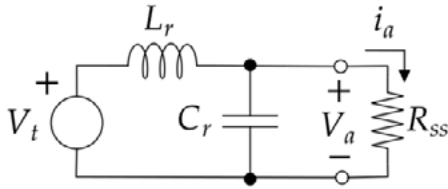


Fig. 3: Circuito equivalente que modela el sistema convertidor-motor operando bajo régimen estacionario.

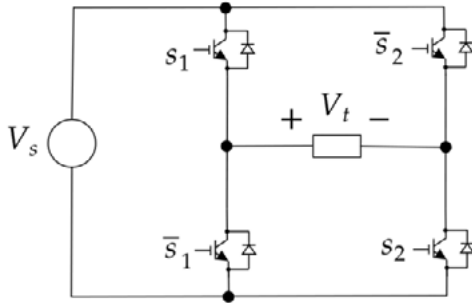


Fig. 4: Circuito equivalente que modela el sistema convertidor-motor operando bajo régimen estacionario.

Modelo Conmutado.

Para obtener el modelo conmutado del convertidor, se consideran las siguientes suposiciones [7]: (1) Cada conmutador controlado y diodo opera como un cortocircuito en su estado de conducción. (2) Cada conmutador controlado y diodo actúa como un circuito abierto en su estado de bloqueo. (3) Se desprecian las dinámicas asociadas con el proceso de conmutación de los elementos semiconductores.

En la Tabla 1 se presenta el efecto que posee cada una de las posibles configuraciones que se pueden aplicar en la tensión presente a la salida del bloque de conmutación.

Tabla. 1: Efecto de las configuraciones de los conmutadores en la salida del bloque de conmutadores.

Configuración		
s_1	s_2	V_t
1	1	V_s
0	1	0
1	0	0
0	0	$-V_s$

Analizando esta tabla de verdad se establece que:

$$V_t = [s_1 s_2 - (1 - s_1)(1 - s_2)]V_s \quad (9)$$

Si se considera que $s_1 = s_2$ y que $s_1 \in \mathbb{N}$ y $s_1 \in [0,1]$, entonces:

$$V_t = (2s_1 - 1)V_s \quad (10)$$

Por tanto, las ecuaciones diferenciales presentadas en (8), pueden ser re-escritas como:

$$\begin{aligned} L_r \frac{d}{dt} i_r &= 2V_s s_1 - V_a - V_s \\ C_r \frac{d}{dt} V_a &= i_r - \frac{1}{R_{ss}} V_a \end{aligned} \quad (11)$$

Modelo Promediado.

Un modelo promediado describe un sistema en términos de su frecuencia fundamental de operación y es ampliamente utilizado en el análisis de dispositivos basados en electrónica de potencia [8]. En estos modelos, no se busca replicar completamente el comportamiento del sistema, ya que se desprecian las conmutaciones de alta frecuencia. [7]. Estos modelos son ampliamente utilizados en el diseño de controladores debido a su simplicidad y a que son válidos en los rangos de frecuencias en los que el controlador del sistema puede operar.

Para la obtención del modelo promediado basta con utilizar el operador promediante, el cual fue utilizado por Yazdani e Iravani en [7] para el modelado de un puente H utilizado como un inversor monofásico. Este operador se define como se presenta a continuación:

$$\bar{x} = \int_t^{T+t} x(\tau) d\tau \quad (12)$$

donde $x(\tau)$ es la variable conmutada que se le desea aplicar este operador, la cual debe ser una función periódica, T es el periodo que posee la variable conmutada y $\bar{x}$ es el valor

promediado. Al aplicar este operador, se obtiene que:

$$d = \int_t^{T+t} s_1(\tau) d\tau \quad (13)$$

siendo $d \in \mathbb{R}$ el ciclo útil que se le aplica al conmutador. El valor del ciclo útil se encuentra circunscrito entre los valores 0 y 1. Por tanto, teniendo en cuenta este resultado, el modelo promediado del convertidor analizado está dado por el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden.

$$\begin{aligned} L_r \frac{d}{dt} i_r &= 2V_s d - V_a - V_s \\ C_r \frac{d}{dt} V_a &= i_r - \frac{1}{R_{ss}} V_a \end{aligned} \quad (14)$$

Considerando un cambio de variables, en el cual se asume que $m = 2d - 1$, se obtiene la siguiente función de transferencia, mediante la cual se describe el proceso de conversión que se produce en el interior del convertidor de potencia:

$$G_{M3}(s) = \frac{V_a(s)}{m(s)} = \frac{R_{ss} V_s}{C_r L_r R_{ss} s^2 + L_r s + R_{ss}} \quad (15)$$

Es importante señalar que la señal moduladora utilizada como comando para la operación del motor puede tomar valores tanto negativos como positivos. Este hecho justifica el uso de señales portadoras bipolares [8]. Con estas señales, es posible diseñar una ley de control que permita al motor girar en ambos sentidos y operar en régimen de frenado, sin necesidad de invertir la polaridad de la fuente de corriente continua que lo alimenta.

3.3. Validación de los Modelos Analíticos.

En la Tabla 2 se presenta el valor nominal asociado a cada uno de los componentes que integran el sistema mecatrónico analizado. Estos valores nominales serán utilizados como referencia para realizar los procesos de validación pertinentes.

Los valores asociados a los filtros de rizado fueron seleccionados acorde a la metodología propuesta por Anritter et al. en [9]. Teniendo en cuenta estos valores nominales se obtiene que $R_{ss} \approx 72 \Omega$. Las funciones de transferencia que serán utilizadas para modelar el comportamiento del motor de corriente directa se corresponden con las presentadas en 16.

Tabla. 2: Efecto de las configuraciones de los conmutadores en la salida del bloque de conmutadores.

Variable	Valor	Unidad
L_a	28.44	mH
R_a	1.27	Ω
k_e	0.35	V/(rad/s)
k_i	0.35	N · m/A
J	6.96e-3	kg · m ²
b	1.73e-3	N · m/(rad/s)
L_r	4.7	mH
C_r	47	μF
V_s	90	V

$$\begin{aligned} G_{M1}(s) &= \frac{0.35}{2 \times 10^{-4} s^2 + 8.9 \times 10^{-3} s + 0.1247} \\ G_{M3}(s) &= \frac{6.5 \times 10^3}{1.6 \times 10^{-5} s^2 + 4.7 \times 10^{-3} s + 71.81} \end{aligned} \quad (16)$$

Cabe destacar que $\frac{\omega(s)}{m(s)} = G_{M1}(s)G_{M3}(s)$. A continuación, se valida el modelo analítico utilizando el modelo desarrollado en *Simscape* como referencia. En la simulación, se considera una frecuencia de conmutación de 4.5 kHz para los interruptores del convertidor. El método numérico utilizado en la emulación presentada es *Backward Euler* con un período de muestreo fijo de 10^{-5} segundos. En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos para el proceso de validación.

Se observa que las funciones de transferencia obtenidas replican los resultados del modelo desarrollado en *Simscape*. Por lo tanto, estas funciones son válidas para el análisis de la dinámica del convertidor propuesto, en las cuales se ha considerado el modelado del motor CD como un elemento resistivo puro.

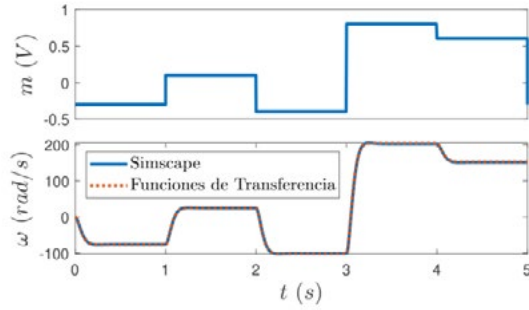


Fig. 6: Resultados obtenidos del proceso de validación de la función de transferencia $\frac{\omega(s)}{m(s)}$.

3.4. Esquema de Control Propuesto.

Se propone un esquema de control lineal en lazo cerrado para regular la velocidad del motor mediante la señal moduladora m , que incluye un regulador $C_\omega(s)$, y un saturador. Este último limita la señal moduladora a un valor absoluto máximo de uno, evitando la saturación de los pulsos en los conmutadores del convertidor.

Se selecciona la teoría clásica de control y el análisis basado en frecuencia para diseñar un esquema de control lineal robusto que ofrece márgenes de estabilidad, superando en simplicidad y efectividad a métodos como ubicación de polos o control no lineal, y sin depender de la cancelación de dinámicas propias del sistema.

El controlador $C_\omega(s)$ debe garantizar precisión, por lo que es útil añadirle una acción integral asegurando un error nulo en régimen estacionario respecto a la velocidad de referencia. Teniendo en cuenta las condiciones antes descritas se propone el siguiente controlador:

$$C_\omega(s) = \frac{0.04}{s} \frac{0.1s + 1}{0.01s + 1} \quad (17)$$

El controlador incluye un compensador de adelanto y una acción integradora con ganancia ajustada para asegurar un ancho de banda adecuado, logrando una respuesta rápida. El compensador de adelanto mejora el

margen de fase, permitiendo una respuesta sobre-amortiguada. Este diseño garantiza un sistema estable y robusto, con un margen de fase de 80° , un margen de ganancia de 17.6 dB, un ancho de banda de 14.4 rad/s , y un tiempo de establecimiento aproximado de 0.28 s.

4. Discusión.

A continuación, se analiza el desempeño del esquema de control propuesto considerando el modelo del sistema mecatrónico en su representación en espacio de estado. Este modelo, basado en un enfoque promediado, emula tanto la dinámica del sistema como las perturbaciones que puedan influir en su comportamiento.

La principal ventaja de utilizar este modelo es la reducción significativa en los tiempos de simulación en comparación con los obtenidos al emplear el modelo basado en funciones de *Simscape*. La representación en espacio de estado está dada por medio del siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\begin{aligned} L_r \frac{d}{dt} i_r &= V_s m - V_a \\ C_r \frac{d}{dt} V_a &= i_r - i_a \\ L_a \frac{d}{dt} i_a &= V_a - R_a i_a - k_e \omega \\ J \frac{d}{dt} \omega &= k_i i_a - \tau_L - b \omega \end{aligned} \quad (18)$$

Los resultados que se obtienen al aplicar el esquema de control propuesto al sistema mecatrónico se presentan en la Figura 8. En esta prueba se consideraron variaciones en el torque producido por una carga acoplada al eje del motor, así como modificaciones en el voltaje de la fuente que alimenta la etapa de potencia del convertidor. Estas perturbaciones, junto con la señal moduladora generada por el controlador propuesto son mostradas a continuación.

En estos resultados se demuestra la capacidad del controlador propuesto para alcanzar los valores de referencia aplicados a pesar de las perturbaciones que son aplicadas. En todo momento el controlador genera señales moduladoras suaves, lo cual posibilita que la dinámica asociada a la velocidad de rotación del motor sea sub-amortiguada.

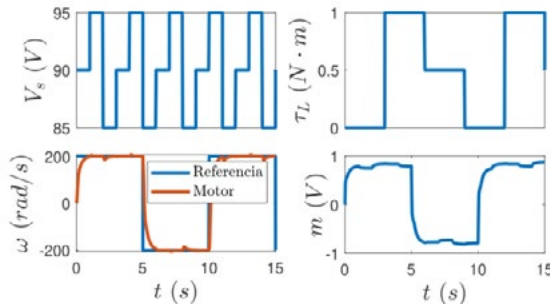


Fig. 8: Resultados obtenidos con la aplicación del esquema de control propuesto.

5. Conclusiones

Se desarrolló un modelo dinámico de un motor de corriente continua con imanes permanentes, controlado mediante un convertidor de puente H completo, permitiendo el cambio de sentido de giro sin alterar la polaridad de la fuente de alimentación. A partir de este modelo, se propuso un esquema de control basado en las funciones de transferencia y el diseño en frecuencia de la teoría de control clásico. La evaluación del desempeño demostró la efectividad del control en la regulación de la velocidad del motor. Este esquema es aplicable a prototipos reales mediante su implementación en tiempo discreto, considerando un tiempo de muestreo acorde al ancho de banda propuesto.

Referencias

[1] V. Sankardoss and P. Geethanjali, "PMDC Motor Parameter Estimation Using Bio-Inspired Optimization Algorithms," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11244–11254, 2017, doi:

10.1109/ACCESS.2017.2679743.

- [2] D. A. Barkas, G. C. Ioannidis, C. S. Psomopoulos, S. D. Kaminaris, and G. A. Vokas, "Brushed dc motor drives for industrial and automobile applications with emphasis on control techniques: A comprehensive review," *Electron.*, vol. 9, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.3390/electronics9060887.
- [3] O. and A.-R. Y. A. and L.-S. O. González-Morales Davidand García-Beltrán, "Experimental Modelling of DC Motor for Position Control Systems Involving Nonlinear Phenomena," in *Applied Computer Sciences in Engineering*, F. S. and H.-P. G. J. and D.-G. Y. Figueroa-García Juan Carlosand Garay-Rairán, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 516–528.
- [4] L. Ardhenta and R. K. Subroto, "Feedback Control for Buck Converter - DC Motor Using Observer," in *2020 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG)*, 2020, pp. 30–33. doi: 10.1109/ICEENG45378.2020.9171693.
- [5] J. U. Liceaga-Castro, I. I. Siller-Alcalá, J. D. G. S. Román, and R. A. Alcántara-Ramírez, "PI Speed Control with Reverse Motion of a Series DC Motor Based on the Noise Reduction Disturbance Observer," *Actuators*, vol. 11, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/act11050117.
- [6] J. Slough, M. Belcher, T. Tsui, and S. Bhattacharya, "Modeling and Simulation of Electric Vehicles Using Simulink and Simscape," in *2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall)*, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625192.
- [7] A. Yazdani and R. Iravani, "Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications," *Voltage-Sourced Convert. Power Syst. Model. Control. Appl.*, Mar. 2010, doi: 10.1002/9780470551578.
- [8] F. Vasca and L. Iannelli, Eds., "Dynamics and Control of Switched Electronic Systems," 2012, doi: 10.1007/978-1-4471-2885-4.
- [9] F. Anritter, P. Maurer, and J. Reger, "FLATNESS BASED CONTROL OF A BUCK-CONVERTER DRIVEN DC MOTOR," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, no. 16, pp. 36–41, Jan. 2006, doi: 10.3182/20060912-3-DE-2911.00010.

Comparativa granulométrica y comportamiento de finos de pétreos de origen natural y reciclados de concreto.

Granulometric comparison and behavior of stone fines of natural origin and recycled concrete.

González Porta, Flor María de los Ángeles* y Hernández Zaragoza, Juan Bosco*

*Universidad Autónoma de Querétaro**

Querétaro, México

angelesgporta@gmail.com

Palabras clave: VTM, material reciclado, material de banco, pétreos.

Resumen- Esta investigación evalúa las características de los materiales reciclados, que varían según el concreto de origen, por lo que cada banco de reciclado debe ser evaluado según la normativa mexicana vigente. Los materiales reciclados pueden usarse en construcción, aunque no necesariamente en capas estructurales debido a la variabilidad en su distribución granulométrica, pero sí en capas inferiores como terracerías. Se realizaron pruebas de laboratorio, identificando una alta concentración de arenas en los reciclados de concreto (60.22%) frente a los naturales (30.95%). Se comparó la granulometría, textura y comportamiento de los finos, destacando que estos mejoran la resistencia del concreto al rellenar fisuras. La investigación se centra en la evaluación de la factibilidad de uso de materiales reciclados por medio de parámetros establecidos en la normativa como una alternativa sustentable en la construcción de carreteras, comparando materiales de origen natural y procesado, concluyendo que la combinación de ambos mejora el rendimiento de las mezclas. En Querétaro, solo hay un banco de reciclado de construcción normado, y se recomienda su uso combinado para mejorar la distribución granulométrica y las propiedades mecánicas de las mezclas.

Keywords: VTM, recycled material, bench material, stone.

Abstract- This research evaluates the characteristics of recycled materials, which vary depending on the concrete of origin, so each recycling bank must be evaluated according to current Mexican regulations. Recycled materials can be used in construction, although not necessarily in structural layers due to the variability in their granulometric distribution, but in lower layers such as dirt roads. Laboratory tests were carried out, identifying a high concentration of sand in the recycled concrete (60.22%) compared to the natural ones (30.95%). The granulometry, texture and behavior of the fines were compared, highlighting that these improve the resistance of the concrete by filling cracks. The research focuses on the evaluation of the feasibility of using recycled materials through parameters established in the regulations as a sustainable alternative in road construction, comparing materials of natural and processed origin, concluding that the combination of both improves performance. of the mixtures. In Querétaro, there is only one regulated construction recycling bank, and its combined use is recommended to improve the particle size distribution and mechanical properties of the mixture

1. Introducción

En los últimos años, ha surgido una creciente demanda y relevancia del proceso de reciclaje. A pesar de ello, en México, la proporción de materiales reciclados sigue siendo limitada, alcanzando aproximadamente el 9.63% del volumen total de residuos generados en 2012,

según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2012). En años posteriores, la atención se ha centrado más en los puntos de recolección y la cantidad de residuos recibidos que en el análisis detallado del proceso de reciclaje en sí.

La Unión Europea informó en 2018 la generación de 2317 millones de toneladas de residuos, de las cuales el 36% provino de la industria de la construcción, aproximadamente 834 millones de toneladas, en relación a este se menciona que el uso de polvo de piedras y agregados reciclados de origen de concreto con una forma eficiente de alcanzar un desarrollo sustentable dado que se obtuvieron resultados satisfactorios en resistencia, durabilidad y resistencia al fuego reduciendo a la par la contaminación, la reducción de los campos de tierra (al explotar el banco se pierde terreno) y salvando recursos naturales siendo una solución en la producción de nuevos concretos “verdes” como los producidos por Ragonjanin et.al. en 2013. [5][6]

En una de las investigaciones más antiguas que se reportaran se tiene que Fergus (1981) experimento con un agregado de concreto reciclado que había soportado 300 ciclos en una cámara de congelamiento y deshielo sorprendentemente los resultados fueron que los agregados reciclados mantenían sus propiedades siendo durables y de buena calidad esto quiere decir que estructuras existentes de concreto además de proveer una fuente de agregados reciclados en el presente podrían ser ocupadas también en el futuro sin afectar sus características y calidad. Usar residuos en el concreto puede ser beneficioso tanto en la industria de la construcción mejorando las características de durabilidad y resistencia del concreto así como en la industria del manejo de residuos para lograr una estrategia de cero residuos con la aproximación de una economía circular. [4] [8]

Las ventajas de uso de concreto reciclado son: el uso de un material que de otra manera sería clasificado como desperdicio, reducción del uso de combustible, kilómetros de acarreo y uso de recursos no renovables (bancos de materiales naturales). Se tienen trabajos que decidieron evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto con pétreos

reciclados con origen base cemento siendo el módulo elástico mayor que un concreto convencional. [7]

Tanto el agregado fino como el agregado grueso deben presentar una graduación adecuada para ocupar todos los espacios y generar mezclas más densas y compactas. La proporción de agregado fino que atraviesa los tamices tiene repercusiones en la manejabilidad, la capacidad de lograr acabados de calidad, la textura superficial y la exudación del concreto de acuerdo con investigaciones. [1]

Cuerpo

2.1 Materiales y equipos

Los materiales utilizados en las pruebas fueron suministrados por dos bancos de materiales uno siendo los pétreos naturales del banco “corporativo Abraham González” ubicado en la cañada municipio de el marqués, Querétaro este material se recolectó de una obra ubicada frente a Boulevard de la Nación y Avenida Cerro Sombrerete como se observa en la figura 1, los materiales reciclados se obtuvieron del banco “Reurba” ubicado en el refugio, Querétaro cerca del IMSS Hospital General Regional 2 El Marqués, como se observa en la figura 2.

Los equipos a utilizar fueron un cuarteador metálico bajo las especificaciones de la normativa M-MMP-1-03/03 de la secretaria de comunicaciones y transportes (SCT), así como un cuchara, tres bandejas y una charola rectangular esta última para depositar el material que no se ocuparía todo este material se observa en la figura 3.

Para la granulometría se ocupó un juego de mallas, para las gravas siendo la malla 3”, 2”, 1 ½”, 1”, ¾”, ½”, 3/8”, ¼” y No.4 mientras que para las arenas y finos se ocuparon las mallas No.10, No.20, No.40, No.60, No.100 y No.200 esto de acuerdo con la normativa SCT M-MMP-1-06/03, estas mallas se observan en la figura 4, adicionalmente se ocupó un cucharón para el vertido del material en las mallas así

como una charola como fondo y la tapa superior para evitar pérdida de finos.

El equipo utilizado para la obtención de los límites de Atterberg o límites de consistencia fue la copa de casa grande y confirmando los mismos con el método de penetrómetro cónico, en la figura 5 se aprecia la copa de casa grande y el penetrómetro respectivamente, adicionalmente se ocupó un mortero de porcelana con pistilo para la homogenización y mezclado de los finos y agua.

2.2. Métodos experimentales

Los métodos experimentales consistirán en las distintas pruebas de laboratorio efectuadas a los materiales pétreos, así como la normativa utilizada. el material pétreo reciclado fue ensayo bajo la misma normativa aplicable a pétreos naturales, la metodología puede ser resumida en la figura 6.

FASE 1

Selección de bancos de materiales

Los agregados naturales empleados en el proyecto fueron extraídos de la cantera perteneciente al corporativo Abraham González, ubicada en la cañada del municipio del Marqués, Querétaro. Esta fuente ha sido reconocida por suministrar materiales pétreos de alta calidad que cumplen con las normativas.

La elección del banco "Reurba" como proveedor de los agregados pétreos reciclados se basó en que la empresa posee la única certificación en el registro de prestadores de servicios ambientales en materia de impacto ambiental, especializada en residuos de construcción, en el estado de Querétaro. Además, se tomó en cuenta la accesibilidad de este banco y la disposición del propietario para suministrar el material necesario.

Cuarteo del material (M-MMP-1-03/03)

Antes de llevar a cabo el cuarteo, se procedió a realizar un proceso de secado y desagregación de ambos materiales con el fin de prepararlos adecuadamente. Utilizando un cuarteador metálico que cumplía con las especificaciones establecidas en la normativa como se ilustra en la figura 7, se llevó a cabo el cuarteo.

Posteriormente, para obtener porciones representativas que permitieran realizar las pruebas de laboratorio necesarias, se descartó una de las mitades y se seleccionó la otra de manera aleatoria. Este proceso de repitió cuatro veces debido a que se tomaron tres muestras de material pétreo reciclado de distintas zonas del banco y una muestra de material pétreo natural, la decisión de tomarse varias muestras del banco de materiales reciclados surgió debido a que los agregados reciclados suelen tener características muy variables esto incluso dentro del mismo proveedor.

Análisis granulométrico (SCT M-MMP-1-06/03)

Este ensayo tiene la finalidad de identificar la distribución de tamaños de las partículas que conforman los materiales pétreos empleados. Los resultados obtenidos son esenciales para comprender la distribución de tamaños de las partículas en los materiales y desempeñan un papel crucial en el proceso de diseño y construcción, se realizaron en total cuatro análisis granulométricos siendo tres a los agregados reciclados y uno a los agregados naturales.

FASE 2

En el trabajo anterior "Comparativa del desgaste de materiales pétreos de origen natural y materiales pétreos reciclados" se presentó y analizó las pruebas de laboratorio enfocadas al desgaste y a la resistencia del intemperismo. [4]

Límites de Atterberg (M-MMP-1-07-07)

Estas pruebas proporcionan información sobre las propiedades de deformación de la fracción de materiales para terraplenes que pasa a través de la malla N°40 (0.425 mm). Los resultados de estas pruebas se emplean principalmente para la identificación y clasificación de los suelos.

El proceso de prueba implica la determinación del límite líquido, que es el contenido de agua en el cual un suelo plástico exhibe una resistencia al corte de 2.45 kPa (25 g/cm²), marcando la transición entre estados semilíquido y plástico. Además, se evalúa el

límite plástico, que es el contenido de agua para el cual un cilindro de suelo se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm, marcando la transición entre estados plásticos y semisólidos. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

Adicionalmente durante la realización de las pruebas se encontró que ambos finos de los pétreos eran materiales poco plásticos por lo que se realizó otra prueba siendo esta la siguiente:

Método del cono de penetración (BS 1377:2-1990)

Se basa en soltar un cono con dimensiones definidas como el de la figura 8, durante un lapso de 5 segundos sobre una muestra de suelo, con el propósito de evaluar la profundidad de penetración. Este método presenta una menor influencia por parte del operador, lo cual constituye una ventaja significativa. Además permite obtener resultados de manera más acertada y fácil de materiales limosos y/o arenosos con bajo índice de plasticidad.

Cálculo de CO₂

Este punto se agregó a fin de analizar la factibilidad en cuanto a emisiones de un pétreo reciclado contra un pétreo natural.

Cuando se evalúa la contribución a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), es crucial considerar no solo el dióxido de carbono (CO₂), sino también otros gases como el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), el vapor de agua (H₂O), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el ozono (O₃) y varios gases fluorados. Estos gases, aunque en menor cantidad que el CO₂ en términos de emisiones absolutas, pueden tener un impacto significativo en el calentamiento global debido a su mayor potencial de calentamiento global (GWP) por unidad de masa y su duración en la atmósfera.

Por lo tanto, para tener una visión más completa del impacto climático total de las emisiones, es común expresar las emisiones de GEI en términos de CO₂ equivalente (CO_{2e}). Esta medida convierte todas las emisiones de GEI en una concentración equivalente de CO₂

que tendría el mismo efecto de forzamiento radiativo durante un período de tiempo específico, generalmente 100 años. El cálculo del CO₂ equivalente se basa en los diferentes potenciales de calentamiento global de cada gas, que representan su capacidad relativa para atrapar el calor en la atmósfera en comparación con el CO₂ durante ese período de tiempo.

Este enfoque de CO₂ equivalente proporciona una métrica estandarizada y fácilmente comparable para comprender y comunicar el impacto climático total de todas las emisiones de GEI, permitiendo a los responsables de la formulación de políticas, empresas y otras entidades tomar decisiones informadas sobre la mitigación y adaptación al cambio climático.

Para el cálculo de CO_{2e} se tomaron en consideración valores del libro “Reducción de la huella de carbono del ciclo de vida de los pavimentos” el cual menciona que la media total de CO_{2e} por tonelada de asfalto de acuerdo con los modelos estudiados es de 0.055 kg CO_{2e}/kg mientras que en asfalto reciclado se tiene un 20% superior de CO_{2e} siendo un total de 0.066 kg CO_{2e}/kg así como los factores proporcionados por Jiménez (2018) el cual menciona en concretos el mayor productor de CO_{2e} es el cemento aunque de igual manera calcula los siguientes valores de CO_{2e}/kg para agregados naturales de 0.00132 m³ piedra/kg y de 0.002 m³ fragmentos/kg.

Una vez calculado todo lo anterior se pasará al último punto de esta segunda fase que es la interpretación de todos los resultados así como una pequeña discusión de que significa cada uno así como si estos valores se encuentran dentro de los valores aceptados por normativa.

FASE 3

En esta última fase se compararán los resultados de los pétreos reciclados y los pétreos naturales y se grafican los resultados en graficas o tablas con el objetivo de hacer más fácil la interpretación de los resultados, en caso de no obtenerse los resultados esperados se procederá a dar una recomendación de las posibles soluciones o una implementación diferente de los agregados pétreos en capas

estructurales de la carretera más inferiores o con menos requerimientos.

2. Resultados y discusión

Después de completar las pruebas en los distintos materiales pétreos, se procedió a realizar un análisis comparativo exhaustivo de los resultados obtenidos. Este análisis se llevó a cabo con el objetivo de evaluar el desempeño de cada material en relación con las normativas específicas aplicadas. Para facilitar la comprensión y organización de los datos, se dividió el análisis y la discusión en secciones correspondientes a cada normativa utilizada. Cada sección incluyó una revisión detallada de los resultados relevantes, destacando cualquier desviación significativa de los estándares establecidos y proporcionando una interpretación contextualizada de los hallazgos.

Análisis granulométrico

El material natural pasado por las mallas y dieron como resultado un tamaño nominal de 2 mm lo que correspondería con una arena, a pesar de ello la presencia de grava es mayor debido a que la diferencia con la malla de 1" y la malla de ½" es muy poca, el material presenta una cantidad menor de arenas de la malla número 40 a la 200 debido a que el proveedor usaría estos pétreos en mezclas con especificaciones únicas para su uso en asfaltos, el resumen de todas las mallas se encuentra en la tabla 1.

En relación con el material pétreo reciclado se encuentra una alta variación en las granulometrías predominando la presencia de arenas en los tres grupos a pesar de recolectarse una de las muestras con intención de ser grava mayormente, siendo en los tres costales el tamaño nominal de 2 mm con presencia en el costal 2 de una alta incidencia de grava de ½" y en el costal 3 una alta presencia de arenas de 0.425 mm, el resumen de todas las mallas se encuentra en la tabla 2. Las curvas granulométricas de las granulometrías tanto de pétreos naturales

como de reciclados de concreto se muestran a continuación en la Fig.9.

En cuanto a la clasificación de acuerdo con el contenido de gravas, arenas y finos tenemos primero la siguiente Ec.1 para el cálculo del coeficiente de uniformidad:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [1]$$

Y también la Ec.2 para el cálculo del coeficiente de curvatura:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}} \quad [2]$$

Donde:

D_{10} = Tamiz por el que pasan el 10% de partículas más pequeñas

D_{30} = Tamiz por el que pasan el 30% de partículas más pequeñas

D_{60} = Tamiz por el que pasan el 60% de partículas más pequeñas

Adicionalmente para el cálculo de los diámetros efectivos anteriormente mencionados es necesaria hacer una interpolación con la siguiente Ec.3:

$$D_x = D_i \cdot \left(\frac{X}{X_i} \right)^{\left(\frac{\log\left(\frac{D_s}{D_i}\right)}{\log\frac{X_s}{X_i}} \right)} \quad [3]$$

Donde:

D_i = Diámetro conocido anterior al diámetro buscado

D_s = Diámetro conocido posterior al diámetro buscado

X = Porcentaje asociado al diámetro buscado

X_i = Porcentaje asociado al diámetro anterior al diámetro buscado

X_s = Porcentaje asociado al diámetro posterior al diámetro buscado

En los diámetros efectivos del material natural se tiene que el D_{10} se obtiene con:

$$D_{10} = 0.85 \text{ mm} \cdot \left(\frac{10\%}{7.9323341\%} \right)^{\left(\frac{\log\left(\frac{2 \text{ mm}}{0.85 \text{ mm}}\right)}{\log\frac{15.8809461\%}{7.9323341\%}} \right)}$$

$$D_{10} = 1.1309 \text{ mm}$$

Debido a que Excel ocupa todos los decimales al ser celdas referenciadas su precisión es

mayor que el cálculo manual dando $D_{10}=1.1491 \text{ mm}$.

$$D_{30} = 4.4101 \text{ mm}$$

$$D_{60} = 15.6378 \text{ mm}$$

Con estos diámetros efectivos se tienen los siguiente C_c y C_u :

$$C_u = \frac{15.6378 \text{ mm}}{1.1491 \text{ mm}}$$

$$C_u = 13.6087$$

$$C_c = \frac{(4.4101 \text{ mm})^2}{(15.6378 \text{ mm})(1.1491 \text{ mm})}$$

$$C_c = 131.0823$$

Con los datos anteriores se puede concluir de los agregados naturales que:

- Es una grava al contener 68.01% de ellas
- Al tener un porcentaje mayor o igual al 20% de arenas estas deben ser nombradas en su clasificación
- Los finos no son decisivos al tener solo un 1.03% de ellos

Los agregados naturales tienen una clasificación SUCS de Grava bien graduada [3] con arena (GW)

Para los agregados reciclados se tienen los siguientes datos, para el costal 1:

$$D_{10} = 0.204141593 \text{ mm} \quad C_u = 22.92601792$$

$$D_{30} = 0.837657186 \text{ mm} \quad C_c = 0.734414107$$

$$D_{60} = 4.680153817 \text{ mm}$$

Para el costal 2 tenemos los siguientes datos:

$$D_{10} = 0.48432232 \text{ mm} \quad C_u = 14.90125215$$

$$D_{30} = 1.730988983 \text{ mm} \quad C_c = 0.857229043$$

$$D_{60} = 7.217009006 \text{ mm}$$

Y para el costal 3 tenemos los siguientes datos:

$$D_{10} = 0.262696846 \text{ mm} \quad C_u = 12.79243713$$

$$D_{30} = 0.687042355 \text{ mm} \quad C_c = 0.534692407$$

$$D_{60} = 3.36053288 \text{ mm}$$

Con los datos anteriores se puede concluir de los agregados reciclados que:

- Los porcentajes más altos son en arenas teniendo 59.7% (costal 1), 50.25% (costal 2) y 70.7% (costal 3).
- Al tener un porcentaje mayor o igual al 20% de gravas, éstas deben ser nombradas en su clasificación.

- Los finos no son decisivos al tener solo un 0.82% (costal 1), 0.52% (costal 2) y 0.16% (costal 3) de ellos de manera natural, sin embargo como se demostró en la investigación anterior “Comparativa del desgaste de materiales pétreos de origen natural y materiales pétreos reciclados” al ser sometidos al desgaste estos materiales tienden a producir un alto contenido de finos por lo que es importante su evaluación.

Los agregados reciclados tienen una clasificación SUCS de Arenas mal graduadas con grava (SP)

Límites de Atterberg

Debido a las propiedades innatas de los finos en ambos materiales se descartó esta prueba debido a la poca cohesión de los materiales.

Método del cono de penetración

En la tabla 3 se observan las humedades a la par de su penetración, un análisis gráfico se muestra la Fig.10 en donde se ven las intersecciones del límite líquido (LL) y límite plástico (LP); para el límite plástico diferentes autores como Bach (2020) y Barreto y Gámez (2017) indican se encuentra a una penetración de entre 2 mm y 2.2 mm respectivamente, en este caso se seleccionó la de 2.2 mm.

Para los finos de los agregados reciclados en la tabla 4 se observan las humedades a la par de su penetración, un análisis gráfico se muestra la Fig.11 en donde se observa las intersecciones del LL y el LP.

Por medio de las gráficas presentadas anteriormente se obtuvo que:

- El límite líquido de los materiales naturales es de 23% mientras que el límite plástico es de 22%.
- Para el límite líquido de los materiales reciclados se tomó una muestra de cada costal, se revolió y se tomó una porción aleatoria dando como resultado un límite líquido de 35% mientras que el límite plástico fue de 34.4%.

Para el cálculo del índice de plasticidad se ocupó la Ec.4:

$$IP = 0.73 (LL - 20)$$

Para los finos naturales esto daría un valor de:

$$IP = 0.73 (23 - 20)$$

$$IP = 2.19$$

Para los finos reciclados esto daría un valor de:

$$IP = 0.73 (35 - 20)$$

$$IP = 10.95$$

De acuerdo con la clasificación SUCS los finos del material natural sería clasificado como un limo inorgánico de baja compresibilidad; los finos del material reciclado serían clasificados como un limo inorgánico de mediana compresibilidad y/o limo orgánico.

Cálculo de CO_{2e}

De acuerdo con la Asociación mundial de las carreteras (2019) los valores para calcular las emisiones de CO_{2e} de pavimentos flexibles y rígidos serían los siguientes:

Para asfalto:

Con pétreos naturales: 0.055 kg CO_{2e}/kg

Con pétreos reciclados 0.066 kg CO_{2e}/kg

Para concretos:

Con pétreos naturales: 0.00132 m³ piedra/kg

Con pétreos reciclados: 0.002 m³ fragmento/kg.

Realizando un ejercicio con estos valores tenemos que una tonelada de material natural basalto producto de la trituración generaría 1000 kg*0.00132 m³/kg dando un total de 1.32 m³ de CO_{2e} mientras que el material reciclado producto de la trituración de diferentes elementos como banquetas y pavimentos generaría un total de 2 m³ de CO_{2e}.

Conclusiones

Los estudios revelan que los materiales reciclados tienen un mayor contenido de arena (60.22%) en comparación con los naturales (30.95%), lo que genera una variabilidad en el tamaño de partículas que dificulta su uso en capas estructurales. Los agregados naturales presentan una mejor graduación, con un Cu de 13.61 y un Cc de 131.08, clasificándolos como gravas bien graduadas con arena, mientras que los reciclados tienen mayor variabilidad, con

un Cu entre 12.79 y 22.93 y un Cc que oscila entre 0.53 y 0.86, clasificándose como arenas mal graduadas. Los límites de Atterberg muestran baja plasticidad en ambos tipos de agregados, aunque los reciclados presentan un límite líquido más alto (35%) e índice de plasticidad mayor (10.95%) que los naturales. Además, los agregados reciclados generan un 20% más de emisiones de CO₂ (0.066 kg CO_{2e}/kg) que los naturales (0.055 kg CO_{2e}/kg), lo que, sumado a su mayor costo y menor consistencia granulométrica, limita su uso en capas superiores.

No se recomienda el uso en sustitución total de agregado pétreo por agregado natural debido a que sus características (excepto resistencia al Intemperismo como lo demostrado en estudios anteriores “Comparativa del desgaste de materiales pétreos de origen natural y materiales pétreos reciclados”) suelen ser menores a los agregados naturales, esto no quiere decir que los agregados sean malos sino que por normativa no cumplen.

Es por ello que es un tema importante y de urgencia desarrollar pruebas que evalúen el desempeño en campo para los materiales pétreos reciclados, otro de los inconvenientes que salió a relucir con los pétreos reciclados en la granulometría fue la gran variabilidad del material en diferentes partes del banco al cual se le requirieron muestras de grava teniendo las tres pruebas como arenas, si bien es una alternativa recomendable ésta de manera realista solo sería aplicable para su uso en terracerías, subrasantes, subbases y bases analizando primero sus características y esto ayudando solamente en el ámbito de cuidado de recursos naturales no renovables.

Si bien el costo tiende a ser más elevado no impacta de manera tan negativa en el ecosistema, desafortunadamente no siendo este el enfoque del proyecto y siendo incluso ligeramente más perjudiciales en emisiones de CO_{2e}, un punto rescatable de los pétreos reciclados es su innata resistencia a las sales y al intemperismo. Otro punto positivo de los

pétreos reciclados, en especial sus finos es que su comportamiento por lo menos desde el punto de vista de límites es el de un limo teniendo una buena trabajabilidad aunque baja cohesión.

No obstante, los reciclados ofrecen ventajas como resistencia a sales e intemperismo, por lo que se recomienda su uso en capas inferiores o subbases, y una combinación con materiales naturales en proporciones menores al 50% para optimizar sus propiedades debido a que es necesario un aprovechamiento de estos desperdicios de la construcción conservándose incluso las características de los pavimentos.

Agradecimientos

Un agradecimiento al laboratorio de suelos de la UAQ.

Referencias

Todas las tablas y figuras se encuentran recopiladas en el siguiente link:

https://drive.google.com/file/d/1WBSH9iCJI36gWucJScQKsW4fAZyhwn2B/view?usp=drive_link

[1] Ahmad Khan, Rizwan, et al. "Experimental Study on Fine-Crushed Stone Dust a Solid Waste as a Partial Replacement of Cement." *Materials Today: Proceedings*, Mar. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.222>. Accessed 27 Mar. 2023.

[2] Alvarado Uribe, Rodolfo, et al. "Comparativa Del Desgaste de Materiales Pétreos de Origen Natural Y Materiales Pétreos Reciclados." *Coloquio POSGRADO FI*, vol. 17, 2023, pp. 261–267, coloquioposgradoingenieria.home.blog/wp-content/uploads/2024/02/memorias-xviii-1.pdf.

[3] Comité technique / Technical Committee / Comité Técnico D.2 Chaussées / Pavements / Firmes de Carretera. *Reducción de La Huella de Carbono Del Ciclo de Vida de Los*

Pavimentos. 2019, p. 60, www.piarc.org/es/pedido-de-publicacion/31426-es-Reducción%20de%20la%20huella%20de%20carbono%20del%20ciclo%20de%20vida%20de%20los%20pavimentos%20-%20Informe%20Técnico. Accessed 31 Oct. 2024.

[4] Hansen, Torben C. "Recycled Aggregates and Recycled Aggregate Concrete Second State-of-The-Art Report Developments 1945–1985." *Materials and Structures*, vol. 19, no. 3, May 1986, pp. 201–246, <https://doi.org/10.1007/bf02472036>.

[5] Jadon, Shreya, and Sunil Kumar. "Stone Dust and Recycled Concrete Aggregates in Concrete Construction: An Efficient Way of Sustainable Development." *Materials Today: Proceedings*, Apr. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.221>. Accessed 12 May 2023.

[6] Radonjanin, Vlastimir, et al. "Green Recycled Aggregate Concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 47, Oct. 2013, pp. 1503–1511, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076>.

[7] S. Tejas, and Dinakar Pasla. *Assessment of Mechanical and Durability Properties of Composite Cement-Based Recycled Aggregate Concrete*. Vol. 387, 1 July 2023, pp. 131620–131620, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131620>. Accessed 28 May 2023.

[8] Vilakazi, Sinqobile, et al. "Reuse of Domestic Sewage Sludge to Achieve a Zero Waste Strategy & Improve Concrete Strength & Durability - a Review." *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 43, Jan. 2023, pp. 122–127, <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.10.012>.

ANÁLISIS DE DUCTILIDAD DE MARCOS DE CONCRETO REFORZADO REHABILITADOS CON LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO

DUCTILITY ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAMES RETROFITTED WITH CARBON FIBER LAMINATES

Solis Alvarado, Francisco Javier; Arjona Catzim, Iván Fermín; Pérez Moreno, Luis Francisco; Horta Rangel, Jaime Moisés; Pérez Lara y Hernández, Miguel Ángel.

*Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Santiago de Querétaro, Querétaro, México
paco.02.03.99@gmail.com*

Palabras clave: EST, ductilidad, marco de concreto, rehabilitación, fibra de carbono.

Resumen- Los marcos de concreto reforzado son deformados en función de las cargas aplicadas. Reforzarlos de forma superficial con polímeros reforzados con fibra de carbono ha tomado relevancia en décadas recientes. Actualmente, el análisis de elementos finitos se ha empleado para modelar estructuras en 2D o 3D, siendo esta última opción la empleada en el presente trabajo debido a las características prestadas. El caso de estudio es una universidad diseñada de acuerdo con el INIFED, tomando el marco crítico o más esforzado, reforzando las uniones viga-columna y el sofito de las vigas con laminados de fibra de carbono y laminados de fibra de carbono con barras de acero, respectivamente. El propósito es analizar las deformaciones y esfuerzos actuantes de los marcos, obteniendo una disminución de las deformaciones mayor al 10%, además de casi el doble de esfuerzos actuantes.

Keywords: EST, ductility, concrete frame, retrofitting, carbon fiber.

Abstract- Reinforced concrete frames deform according to the applied loads. Superficially reinforcing them with carbon fiber-reinforced polymers has gained importance in recent decades. Currently, finite element analysis has been used to model structures in 2D or 3D, with the latter being employed in this work due to its specific characteristics. The case study is a university designed according to INIFED standards, focusing on the critical or most stressed frame, reinforcing the beam-column joints and the soffit of the beams with carbon fiber laminates and carbon fiber laminates with steel bars, respectively. The purpose is to analyze the deformations and stresses acting on the frames, achieving a reduction in deformations of more than 10%, along with almost double the acting stresses.

1. Introducción

La ductilidad es la capacidad de deformación presente en los materiales que constituyen los elementos estructurales, permitiendo altas deformaciones permanentes en ellos previo a la falla o ruptura. Este tema es un área de gran

interés dentro del campo de los marcos de concreto reforzado, los cuales son un tipo de estructura que se conforma por la conexión entre 1 o más vigas y 2 o más columnas, lo cual permite la transmisión de cargas al suelo. Estos están compuestos por diferentes materiales: acero y concreto. Respecto a los marcos de concreto, en México el concreto

puede ser Clase 1 o 2, de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2023; se utilizan 2 criterios para separarlos en estas dos clases: peso volumétrico en estado fresco, y resistencia a la compresión [1].

El refuerzo es un elemento secundario que posee mejores características físicas debido a la forma o al material que está conformado. Para marcos de concreto esto incluye al refuerzo longitudinal con acero, revestimiento con laminados, entre otros. La rehabilitación hace referencia al proceso de intervención estructural para restablecer las condiciones originales o para mejorar el comportamiento de elementos y sistemas estructurales para que la edificación cumpla con los requisitos de seguridad contra colapso y de limitación de daños [1].

Algunas técnicas de rehabilitación incluyen: 1) reparación local de elementos, 2) reparación de grietas mediante fluidos, 3) encamisados de columnas, vigas o uniones con concreto, acero

Material	Ancho de grieta, mm	Nivel de recuperación por ciento			Características
		Resistencia	Rigidez	Ductilidad	
Resina epoxi	0.05 – 5.0	70 – 90	30 – 80	75 – 90	Sensibilidad a altas temperaturas. Difícil de utilizar con material poroso
Lechada	>5.0	70 – 90	50 – 80	70 – 90	Para grietas limpias, sin impurezas
Mortero epoxi		70 – 90	30 – 80	75 – 90	Sensible a altas temperaturas
Mortero de cemento	>5.0	80 – 120	50 – 100	80 – 90	Para elementos con pocas grietas grandes

o compuestos con polímeros reforzados con fibras [2]. Sin embargo, una vez dañados y rehabilitados los elementos estructurales, tales como vigas y columnas, existen pérdidas en la ductilidad de estos en función del método y materiales de rehabilitación empleado. Por ejemplo, reparar las grietas con resina epoxi, lechada, mortero epoxi o mortero de cemento produce pérdidas de ductilidad de al menos 10% y como máximo de 30% (Tabla 1).

Tabla 1. Niveles de recuperación de la capacidad estructural de un elemento reparado con resina epoxi, mortero epoxi o mortero de cemento

El presente trabajo tuvo como objetivo modelar un marco de concreto reforzado con laminados de fibra de carbono y barras de acero en vigas y laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna. Una vez modelado, el marco se analizó con elemento finito con la finalidad de obtener los esfuerzos actuantes, definiendo la ductilidad propia del marco gracias a las deformaciones. Con estos resultados, fue posible comparar las características propias de un marco de concreto reforzado contra aquellas de uno que incorpora laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna y el sofite de la viga.

2. Metodología

En los últimos años, el polímero reforzado con fibra (PRF) se ha aplicado ampliamente para el refuerzo sísmico de estructuras de concreto reforzado, gracias a ventajas como la ligereza, la resistencia, la durabilidad frente a la corrosión y la facilidad de construcción [3], [4]. El método de refuerzo con PRF facilita la construcción eficiente y la renovación económica sin un aumento significativo del espacio ocupado. Se ha estudiado la implementación de fibras en el concreto permeable y su efecto en la resistencia a compresión, porosidad, coeficiente de permeabilidad, módulo de elasticidad, entre otros [5].

Muchos países han implementado regulaciones técnicas relacionadas con el refuerzo con PRF, principalmente para elementos de concreto reforzado. El informe FEMA-P-695 [6] recopiló los últimos avances en el campo de la ingeniería sísmica en Estados Unidos, incluyendo una base de datos de registros de movimientos sísmicos, nuevas generaciones de relaciones de atenuación y

resultados de análisis probabilísticos del riesgo sísmico, así como métodos de modelado y análisis no lineal, métodos numéricos de simulación de colapsos estructurales y modelado y análisis de incertidumbres.

En las décadas recientes, se ha demostrado la efectividad del refuerzo de marcos de concreto reforzado utilizando polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC) [7]. A continuación, se presenta un caso de estudio relevante respecto a la aplicación de laminados de fibra de carbono.

2.1. Modelación de la estructura y polímeros reforzados con fibras.

La estructura es de una universidad diseñada según normas del INIFED, con 11 crujiás en el eje X, 3 en el eje Y, y 2 niveles. En el eje X, las primeras 4 crujiás miden 3.6 m, la quinta 7 m, y de la sexta a la onceava vuelven a 3.6 m. En el eje Y, las crujiás extremas miden 6 m y la central 4 m. Los niveles tienen 3 m de altura. Las columnas de la planta baja miden 45 cm de lado y las de la planta alta 40 cm. Las vigas en planta baja son de 35x70 cm, y en la planta alta de 25x50 cm, con un recubrimiento de 5 cm en los elementos estructurales. La Figura 1 proporciona una vista en 3D de la estructura.

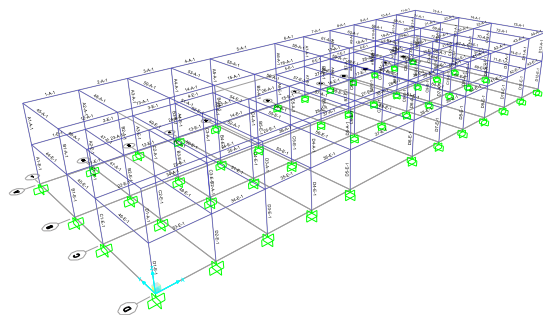


Figura 1. Estructura escolar de acuerdo con el INIFED.

En la Tabla 2 se muestran las características del refuerzo longitudinal empleado.

Tabla 2. Refuerzo de acero longitudinal para los elementos estructurales.

Elemento	Cantidad de varillas	Diámetro de varilla (pulgadas)
Viga de azotea	9	3/4
Viga de entrepiso	12	3/4
Columnas	16	1

Tras el análisis de cargas en el software *SAP2000*, se identificó el marco crítico en el eje Y de la estructura, que tiene 2 niveles de 3 m cada uno y 3 crujiás: 6 m en las orillas y 4 m en la central (Figura 2).

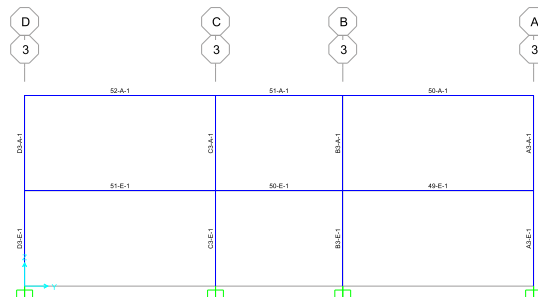


Figura 2. Marco crítico de la estructura de estudio.

El marco crítico identificado se modela utilizando concreto y acero. Las características mecánicas de ambos materiales se presentan en la Tabla 3, con las dimensiones expresadas en MPa en lugar de kg/cm². En este caso, f'_c se refiere a la resistencia a la compresión, f_y a la resistencia a la fluencia, E al módulo de elasticidad, y ν al módulo de Poisson.

Tabla 3. Características mecánicas de los materiales usados.

Material	f'_c (MPa)	f_y (MPa)	E (MPa)	ν
Concreto	25	-	22,000	0.2
Acero	-	420	200,000	0.3

Para modelar los elementos de concreto y el refuerzo de acero, se utilizó el software *ANSYS SpaceClaim*. El concreto de vigas y columnas

se representó como sólidos, y el refuerzo de acero longitudinal y transversal como líneas, siendo este último asignado como refuerzo en lugar de viga para lograr la adherencia entre el concreto y el acero. A cada sólido y línea se le asignaron las propiedades del concreto y acero en *ANSYS Mechanical*, previamente definidas en *Engineering Data* del módulo *Static Structural*. La Figura 3 muestra los elementos en diferentes colores, y la Figura 4 muestra los sólidos transparentes para visualizar el refuerzo de acero.

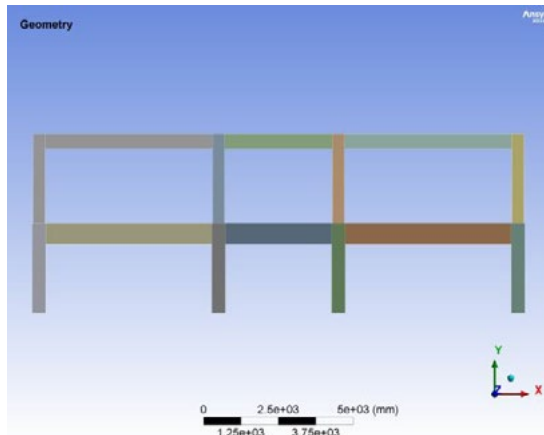


Figura 3. Marco de concreto en ANSYS.

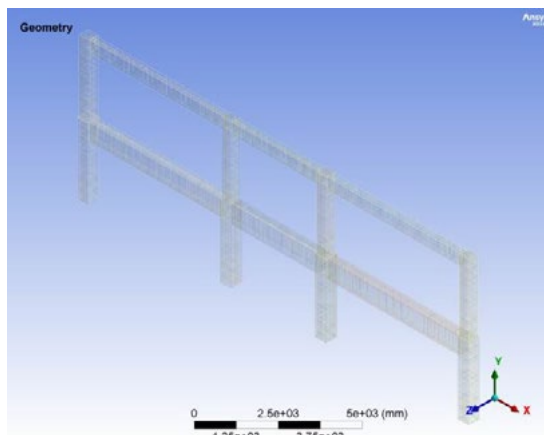


Figura 4. Modelo isométrico del refuerzo de acero.

El marco de concreto no se modeló como un solo bloque, sino que cada columna y viga se modeló por separado, con superficies de contacto asignadas. Este enfoque facilita la aplicación de cargas en cada elemento

estructural y permite una representación más realista de la edificación.

Para el mallado y discretización del marco, se siguen guías que aseguran un análisis con elementos finitos preciso y eficiente. Aunque no hay un tamaño mínimo para los cubos del mallado, sí existe un tamaño máximo para garantizar la exactitud [8]. Un mallado más fino aumenta el tiempo de cálculo, mientras que uno más grueso reduce la confiabilidad de los resultados. Se utilizó un mallado uniforme lineal con hexaedros (cubos) de 50 mm para vigas y columnas del marco de concreto reforzado sin fibra de carbono, como se muestra en la Figura 5.

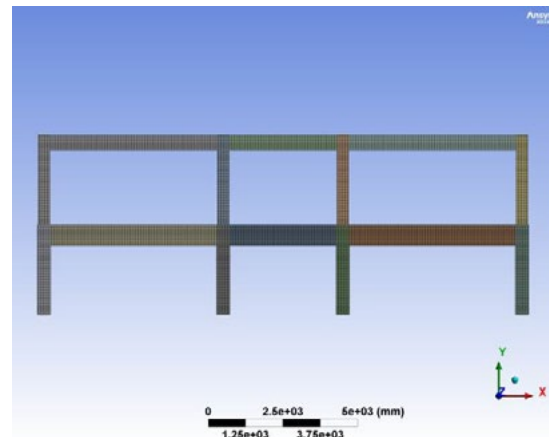


Figura 5. Mallado del marco de concreto.

Se definieron las características de los materiales para el refuerzo con laminados de fibra de carbono y barras de acero. Las barras de acero tienen una resistencia a la fluencia de 420 MPa y un módulo de elasticidad de 200 GPa. La fibra de carbono tiene una resistencia a la fluencia de 513 MPa y un módulo de elasticidad de 230 GPa. Los laminados de fibra de carbono se modelan en las uniones viga-columna y en el soffito de la viga, mientras que las barras de acero solo en el soffito (Figura 6).

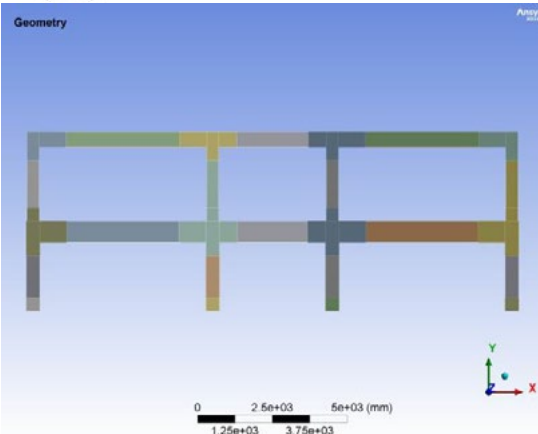


Figura 6. Modelado del marco de concreto con fibra de carbono.

Para el mallado del marco de concreto reforzado con fibra de carbono, se emplearon tetraedros en lugar de hexaedros, dado que el segundo no permite la inclusión de fracturas en los elementos y su posterior análisis. Estos tetraedros de 50 mm se emplean para las vigas, columnas, y los laminados de fibra de carbono.

2.2. Análisis con elemento finito.

El diseño estructural se realizó según las Normas Técnicas Complementarias, asegurando que los esfuerzos permisibles en el marco de concreto sean mayores que las cargas y momentos generados en columnas y vigas. Se utilizó un enfoque de ductilidad baja, con un concreto de al menos 25 MPa de resistencia (Tabla 4), cumpliendo con los requisitos de resistencia a flexión, fuerza cortante, desplazamientos, agrietamientos y carga axial.

Tabla 4. Límites mínimos de f'_c en estructuras de ductilidad baja [1]

Elementos estructurales	f'_c mínimo, MPa (kg/cm ²)
Cimentaciones	25 (250)
Vigas, columnas, muros, losas, diafragmas	25 (250)
Pilotes prefabricados no presforzados	30 (300)
Pilotes prefabricados presforzados	35 (350)

El método de elementos finitos (MEF) se utiliza ampliamente en el análisis estructural de construcciones de concreto reforzado. Anteriormente, se han utilizado modelos de elementos finitos (EF) bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) para analizar vigas de concreto en buen estado, corroídas y reforzadas. Se han utilizado modelos 2D para discretizar la viga, la placa de acero bajo el punto de carga, y el soporte móvil de acero, definiendo sus propiedades materiales y mallando estos elementos en el software ABAQUS [9]. Además, se han desarrollado modelos en 3D con la finalidad de usarlos como plataforma numérica para la predicción del desempeño de vigas de concreto reforzado con aperturas reforzadas al cortante con compuestos de fibra de carbono [10].

Aunque el modelo de elemento finito simétrico en 2D puede ofrecer buenos resultados, el modelo EF 3D puede ser necesario por las siguientes razones: 1) para un tamaño específico de la viga, la suposición de tensión o deformación plana puede no ser completamente precisa, y 2) el refuerzo con PRF puede no aplicarse a toda la anchura de la viga. El análisis mediante el método de elementos finitos (EF) para vigas reforzadas con PRF incluye varias tareas importantes [11].

El software *ANSYS Mechanical* ofrece herramientas para graficar resultados como esfuerzos equivalentes, deformaciones direccionales por eje, deformaciones totales y reacciones en apoyos, utilizando colores y escalas para facilitar su interpretación. El mallado de los elementos se realizó de acuerdo con las guías actuales que proporcionan parámetros del tamaño de los elementos. Dado que las cargas son verticales y horizontales, se recomienda usar las herramientas de deformación direccional en los ejes X y Y, además de la deformación total, ya que esto permite predecir las mayores deformaciones

en la estructura analizada. La Figura 7 muestra las cargas aplicadas en *ANSYS* para replicar los resultados obtenidos en *SAP2000*.

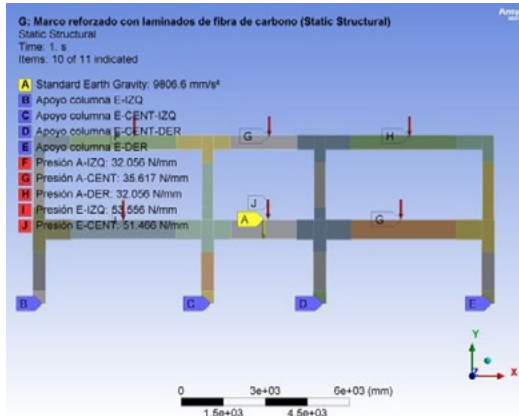


Figura 7. Cargas aplicadas al marco de concreto con laminados de fibra de carbono.

3. Resultados y discusión

Los resultados de las deformaciones y esfuerzos equivalentes fueron obtenidos mediante *ANSYS Mechanical*. En la Figura 8 puede apreciarse la deformación total del marco de concreto reforzado sin la inclusión de fibra de carbono.

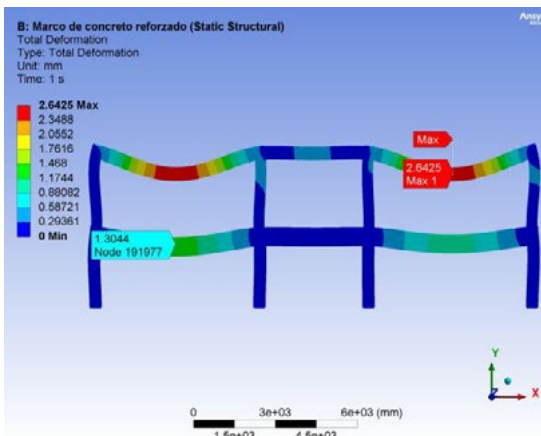


Figura 8. Deformaciones del marco sin fibra de carbono.

Por otra parte, la Figura 9 tiene la deformación total del mismo marco con los laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna y el sofito de la viga. Cada una de las figuras

presenta etiquetas de la ubicación del máximo y mínimo de deformación.

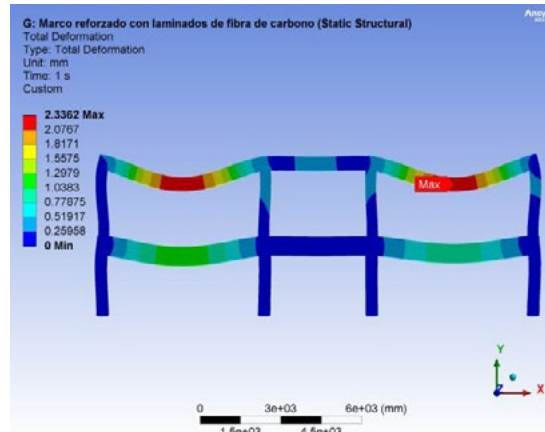


Figura 9. Deformaciones del marco con fibra de carbono.

La Tabla 5 muestra las deformaciones propias de los marcos sin y con laminados de fibra de carbono.

Tabla 5. Deformaciones de los marcos de concreto

Caso de estudio	Deformación (mm)
Marco sin fibra de carbono	2.6427
Marco con fibra de carbono	2.3362

Esto representa una disminución de 11.59% en las deformaciones con las mismas cargas en ambos marcos, con la diferencia de la aplicación de laminados de fibra de carbono.

Es importante mencionar el cambio en la magnitud y ubicación de los esfuerzos en el marco de concreto, dado que por la inclusión de laminados de fibra de carbono estos aumentan de 47.71 MPa hasta 74.44 MPa (Figura 10 y Figura II). Lo anterior se debe a la redistribución de los esfuerzos ocasionada por la incorporación de laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna y en el sofito de las vigas.

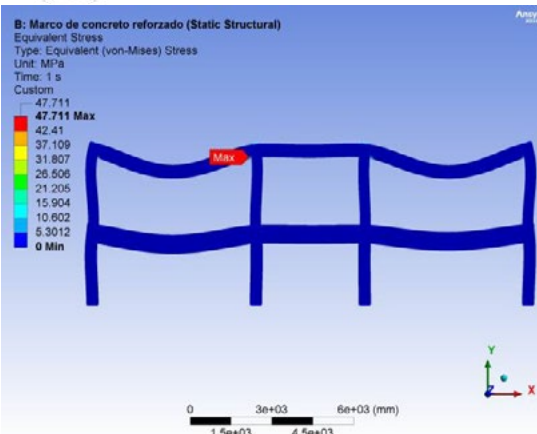


Figura 10. Esfuerzos en el marco sin fibra de carbono.

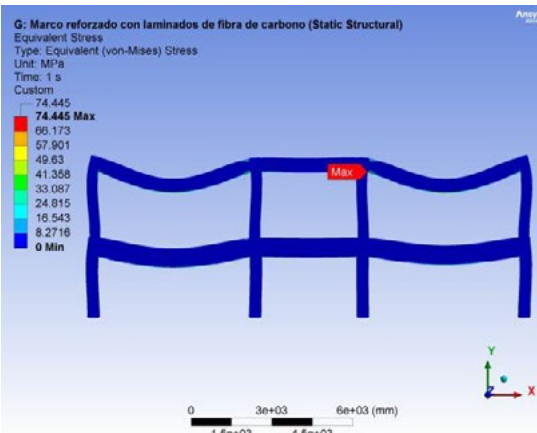


Figura 11. Esfuerzos en el marco con fibra de carbono.

Tomando las deformaciones obtenidas por [7], y obviando el signo asignado a cada una propias de los especímenes comparados, al realizar una relación entre las deformaciones por fluencia se obtiene un aumento del 4.8% de estas en el marco reforzado respecto al marco de contraparte o sin reforzar. Cabe resaltar que el método de refuerzo, las dimensiones de los elementos, y las propiedades mecánicas son diferentes de aquellas presentes en este trabajo, por lo que es complicado realizar una comparación a detalle entre ambos.

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- Incorporar laminados de fibra de carbono disminuye las deformaciones propias del marco de concreto.
- Los esfuerzos equivalentes aumentan su magnitud debido al aumento de capacidad y redirección de las cargas de elementos de concreto hacia laminados de fibra de carbono.
- Se recomienda analizar el comportamiento de marcos de concreto reforzado dañados que sean rehabilitados con laminados de fibra de carbono.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo brindado para continuar mis estudios de posgrado.

Al M. en C. Iván Fermín Arjona Catzim por su asesoramiento a lo largo de mi trabajo de tesis.

Referencias

- [1] Gobierno de México, *Normas Técnicas Complementarias 2023*. Ciudad de México, 2023.
- [2] American Concrete Institute. and ACI Committee 440., *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute, 2017.
- [3] Y. Liu, L. Fan, W. Wang, Y. Gao, and J. He, "Failure Analysis of Damaged High-Strength Bolts under Seismic Action Based on Finite Element Method," *Buildings*, vol. 13, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/buildings13030776.

- [4] L. Wang, Y. Zhou, S. Nagarajaiah, and W. Shi, “Bi-directional semi-active tuned mass damper for torsional asymmetric structural seismic response control,” *Eng Struct*, vol. 294, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116744.
- [5] M. G. Lee, W. C. Wang, Y. C. Wang, Y. C. Hsieh, and Y. C. Lin, “Mechanical Properties of High-Strength Pervious Concrete with Steel Fiber or Glass Fiber,” *Buildings*, vol. 12, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/buildings12050620.
- [6] Federal Emergency Management Agency (FEMA), “NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA Report 273,” Washington, 1997.
- [7] Y. Wang, W. Chen, D. Li, H. Xu, F. Zhang, and X. Guo, “Experimental and Numerical Investigations of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames Strengthened with CFRP Sheets,” *Buildings*, vol. 13, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/buildings13092195.
- [8] A. De Boer, M. A. N. Hendriks, J. A. Den Uijl, B. Belletti, and C. Damoni, “Nonlinear FEA guideline for modelling of concrete infrastructure objects,” in *Computational Modelling of Concrete Structures - Proceedings of EURO-C 2014*, Taylor and Francis - Balkema, 2014, pp. 977–985. doi: 10.1201/b16645-109.
- [9] A. Mathern and J. Yang, “A practical finite element modeling strategy to capture cracking and crushing behavior of reinforced concrete structures,” *Materials*, vol. 14, no. 3, pp. 1–26, Feb. 2021, doi: 10.3390/ma14030506.
- [10] R. A. Hawileh, T. A. El-Maaddawy, and M. Z. Naser, “Nonlinear finite element modeling of concrete deep beams with openings strengthened with externally-bonded composites,” *Mater Des*, vol. 42, pp. 378–387, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.004.
- [11] M. Gotame, C. L. Franklin, M. Blomfors, J. Yang, and K. Lundgren, “Finite element analyses of FRP-strengthened concrete beams with corroded reinforcement,” *Eng Struct*, vol. 257, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114007.

Modelación computacional de suelos no saturados: Una revisión bibliográfica de modelos acoplados hidromecánicos

Computational modeling of unsaturated soils: a literature review of coupled hydromechanical models

Autor: Faunde Artilles, Gennys
Afiliación: Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, Mexico
gfaunde1996@gmail.com

Palabras clave: VTM, suelos, no saturados, modelos, simulación, geotecnia, hidromecánico

Resumen- Se presenta una revisión de la literatura reciente sobre la modelación computacional de suelos no saturados, centrándose en los modelos acoplados hidromecánicos, analizando los avances de los últimos 10 años en este campo, destacando las metodologías más prometedoras, los aportes y enfoque de las investigaciones actuales y las direcciones futuras de investigación. Esta revisión proporciona una visión integral del estado actual de la modelación de suelos no saturados, sirviendo como punto de referencia para investigadores y profesionales en geotecnia, ingeniería civil y ciencias del suelo.

Keywords: VTM, soil, unsaturated, models, simulation, geotechnic, hydromechanical

Abstract- A review of recent literature on computational modeling of unsaturated soils is presented, focusing on coupled hydromechanical models, analyzing the advances of the last 10 years in this field, highlighting the most promising methodologies, the contributions and focus of current research, and future research directions. This review provides a comprehensive overview of the current state of unsaturated soil modeling, serving as a reference point for researchers and practitioners in geotechnics, civil engineering and soil sciences.

1. Introducción

El suelo es una estructura de partículas sólidas con poros interconectados. Se considera no saturado cuando los poros están parcialmente llenos de agua, y saturado cuando están completamente llenos [1].

La variación a la que la consolidación ocurre en suelos saturados es determinada por la relación a la que la presión del fluido puede ser expulsado del suelo. Por ende, el proceso de deformación (comportamiento mecánico) y el flujo de la presión de agua (comportamiento hidráulico) en suelos es “acoplado mecánico-flujo” [2]. En suelos no saturados, los esfuerzos de succión afectan el

comportamiento hidráulico, requiriendo un análisis saturado-no saturado para modelar correctamente los cambios de volumen [3]. Los cambios de volumen se deben al contenido de agua: alto contenido lleva a la consolidación, mientras que un bajo contenido puede resultar en expansión [4].

El suelo tiene comportamiento no lineal y este puede explicarse mediante modelos elasto-plásticos basados en la resistencia de Mohr-Coulomb. Recientes avances en herramientas matemáticas y tecnológicas han permitido aplicar la elasto-plasticidad a problemas

complejos como la formulación de modelos constitutivos para suelos no saturados [5]. Los modelos matemáticos para predecir la respuesta de los suelos ante cargas externas se enfocan en:

- a) deformación volumétrica y desviadora
- b) resistencia al esfuerzo cortante
- c) comportamiento hidráulico

Los primeros modelos constitutivos para suelos no saturados se centraron en aislar las variables de estado de esfuerzo relevantes. Es crucial relacionar las variables de manera conjunta [6], ya que el colapso de la matriz sólida puede ser causado por pérdida de presión capilar o fricción del fluido. Asimismo, la deformación de la matriz sólida puede afectar la presión del fluido y el grado de saturación [7].

1.1. Modelos Acoplados de Consolidación Saturada:

Varios modelos han sido desarrollados para simular la consolidación en condición saturada [8], [9], [10], [11], [12].

Las hipótesis comunes en la mayoría de estos modelos incluyen:

- Suelo saturado
- Fluido incompresible
- Fase sólida incompresible pero compresible en conjunto
- Aplicación de la ley de Darcy para el flujo [8], [9], [10].

Bentler [9] incorporó la teoría de pequeñas deformaciones. Manzollillo et al. [10] aplicaron el principio del trabajo virtual y la ley de conservación de la masa. Di-Rado et al. [12] introdujeron el concepto de esfuerzos efectivos en suelos saturados y el método de Galerkin. Krishnamoorthy [11] consideró el comportamiento no lineal del suelo utilizando la relación de Duncan y Chang [13].

1.2. Modelos Acoplados de Consolidación no Saturada:

Usando aproximación temporal y el principio del trabajo virtual, los autores demostraron la

influencia de la Curva de Retención de Agua-Suelo (SWRC) en la consolidación [3].

Basándose en la teoría de Biot y considerando la no linealidad del suelo, los investigadores calcularon simultáneamente las presiones de agua y aire en los poros [14].

Los modelos de consolidación saturada tienen la desventaja de ser aplicables solo a dos fases (sólida-líquida), mientras que los modelos no saturados, aunque más aproximados, pueden mejorarse incorporando el concepto de esfuerzos efectivos para suelos no saturados, considerando tanto la carga externa como los esfuerzos de succión derivados de la SWRC, lo que resulta en un acoplamiento hidromecánico natural [15].

2. Metodología.

Se siguió la siguiente metodología para su la selección y cribado de artículos:

Definición del Tema

- Identificar el tema central
- Determinar el período de tiempo a cubrir.

Selección de Fuentes

- Bases de datos académicas (Scopus, Google Scholar)

Fase de búsqueda

- Identificar palabras clave principales
- Desarrollar combinaciones de búsqueda
- Establecer operadores booleanos (AND, OR, NOT)
- Documentar las búsquedas realizadas

Criterios de Inclusión y Exclusión

- Publicados entre 2014 y 2024
- Publicados en inglés o español
- Texto completo disponible
- Contenido temático

Esta revisión se basa en una búsqueda de artículos publicados entre 2014 y 2024 en las principales bases de datos científicas, incluidas Scopus y Google Scholar. Se utilizaron palabras clave como “suelos no saturados”, “modelado computacional”,

“modelos acoplados hidromecánicos” y sus variantes en inglés.

- a) Búsqueda Inicial: Como se muestra en la Figura 1. la búsqueda se realizó utilizando palabras clave en las bases de datos antes mencionadas.



Figura 1. Cuadro de búsqueda de Scopus. Elaboración propia.

Esta búsqueda arroja un resultado de 25 artículos, por lo que se excluyeron términos de áreas de conocimiento e idioma para evitar publicaciones que no aporten información a la investigación actual. En la Figura 2 se muestra un diagrama de flujo de los criterios y resultados de la fase de búsqueda.

((TITLE-ABS-KEY ("unsaturated soil") AND TITLE-ABS-KEY ("hydromechanical coupling")) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND (EXCLUDE (LANGUAGE , "Portuguese") OR EXCLUDE (LANGUAGE , "Chinese")) AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "SOC") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "ARTS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "BIOC") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "AGRI") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "ENVI") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "EART"))).

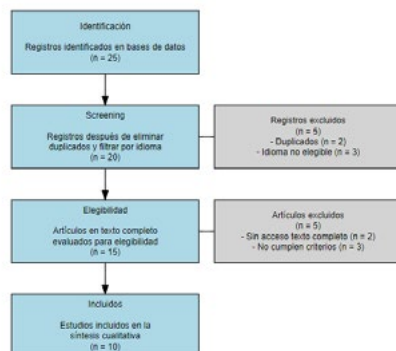


Figura 2: Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos

En la Tabla 1 se relacionan los artículos a los cuales se analizan los títulos y resúmenes para determinar su relevancia inicial.

Tabla 1. Artículos Identificados

Autores	Títulos	Año
Tao G.; Wu X.; Xiao H.; Chen Q.; Cai J.	A Unified Fractal Model for Permeability Coefficient of Unsaturated Soil	2019
Arroyo H.; Rojas E.; Moreno- Martínez J.Y.; Palacios O.; Galván A.	Hydromechanical tensile strength modelling at particle size level for non cohesive granular materials	2024
Huyghe J.M.; Nikooee E.; Sweijen T.; Hassanizadeh S.M.	Two sides of a coin: A critical review, and mathematical and phenomenological study of what we call hydromechanical coupling	2015
Ligurský T.; Michalec Z.	On thermodynamically consistent coupling of the Barcelona Basic Model with a hydraulic model for unsaturated soils	2023
Mao J.-Z.; Guo J.; Fu Y.; Zhang W.-P.; Ding Y.- N.	Effects of Rapid Water-Level Fluctuations on the Stability of an Unsaturated Reservoir Bank Slope	2020
Cai G.; Liu G.; Yang Y.; Zhou A.; Li X.	Hydro-mechanical coupling effect on water permeability of intensely weathered sandstone	2023

Liu M.; Feng X.-M.; Zhao L.-H.; Song Z.-C.; Hu S.-H.; Dai Z.-Y.	A hydro-mechanical coupling model for predicting infiltration and ponding in unsaturated soils	2023
Wang L.; P.J.; Zhu B.; Chen Y.	Cleall Modelling the thermal-hydro-mechanical behaviour of unsaturated soils with a high degree of saturation using an extended precise integration method	2022
Wang W.; Liu J.; Chen J.	Thermo-Hydromechanical Coupling Responses Driven by a Central Heat Source in Unsaturated Soils	2022
Robinson J.D.; Vahedifard F.; Aghakouchak A.	Rainfall-triggered slope instabilities under a changing climate: Comparative study using historical and projected precipitation extremes	2017

- b) Revisión de texto completo: los artículos que pasaron la selección inicial fueron revisados en su totalidad para determinar su inclusión final en la revisión.

3. Resultados y discusión

Para analizar los resultados de la revisión, es importante centrarse en la temporalidad de los artículos y las regiones donde estos temas se investigan más intensamente, y resaltar la contribución específica de cada artículo al estudio de los modelos hidromecánicos relacionados con esta investigación.

3.1. Temporalidad de los artículos

La revisión muestra que en los últimos años ha habido un aumento significativo en la investigación sobre modelos hidromecánicos de suelos no saturados. La mayoría de los artículos revisados por pares se publicaron entre 2019 y 2023, lo que refleja el creciente interés en la investigación sobre el comportamiento de suelos no saturados, (Figura 3). Este aumento de publicaciones se puede adjudicar con la necesidad de desarrollar modelos más precisos que puedan dar cuenta de fenómenos como la infiltración, el comportamiento de succión, la estabilidad de pendientes y la respuesta de suelos expansivos o hundidos.

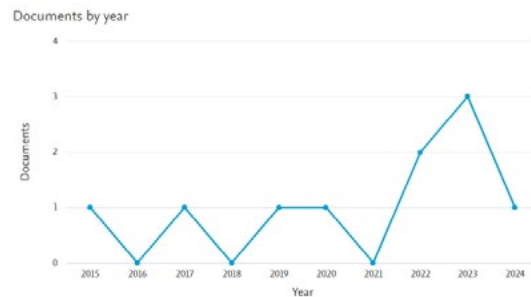


Figura 3: Relación de artículos por año.
Fuente: Scopus

3.2. Análisis de los artículos

1. A Unified Fractal Model for Permeability Coefficient of Unsaturated Soil [16].

En este artículo desarrollaron un modelo unificado fractal para estimar el coeficiente de permeabilidad en suelos no saturados, lo que facilita la evaluación del acoplamiento hidromecánico. Este modelo reduce significativamente los esfuerzos computacionales, permitiendo una mejor aplicación práctica en problemas de infiltración y consolidación.

2. Hydromechanical tensile strength modelling at particle size level for non cohesive granular materials [17].

Se propone un modelo para predecir la variación de la resistencia a la tracción en materiales granulares según el grado de saturación. Este enfoque considera fenómenos capilares que afectan el acoplamiento hidromecánico, crucial para entender cómo las condiciones de humedad influyen en la estabilidad del suelo. Este enfoque es relevante para la consolidación porque muestra cómo los cambios en la presión del agua de infiltración afectan la estabilidad del suelo.

3. Two sides of a coin: A critical review, and mathematical and phenomenological study of what we call hydromechanical coupling [18].

Este estudio proporciona una base teórica sólida para entender los efectos de la succión en el comportamiento del suelo durante procesos de consolidación.

4. On thermodynamically consistent coupling of the Barcelona Basic Model with a hydraulic model for unsaturated soils [19].

Los autores presentan un acoplamiento termodinámicamente consistente entre el Modelo Barcelona y un modelo hidráulico, analizando las restricciones que surgen en la descripción del comportamiento hidráulico. Este enfoque es fundamental para desarrollar modelos que consideren adecuadamente la interacción entre estrés y succión, lo cual es esencial para problemas de consolidación.

5. Effects of Rapid Water-Level Fluctuations on the Stability of an Unsaturated Reservoir Bank Slope [20].

Este artículo investigó cómo las fluctuaciones rápidas del nivel del agua afectan la estabilidad de las pendientes en embalses no saturados. Su análisis incluye efectos de acoplamiento hidromecánico, lo que demuestra que los cambios repentinos en la succión pueden causar deslizamientos de tierra en la superficie,

lo que subraya la importancia del monitoreo continuo para prevenir fallas geotécnicas.

6. Hydro-mechanical coupling effect on water permeability of intensely weathered sandstone [21].

Se explora cómo el estrés y el flujo afectan las propiedades de permeabilidad en areniscas intensamente meteorizadas. Sus hallazgos indican que el estrés altera los canales de infiltración, afectando así la velocidad y el comportamiento durante procesos de consolidación.

7. A hydro-mechanical coupling model for predicting infiltration and ponding in unsaturated soils [22].

Este trabajo presenta un modelo hidromecánico totalmente acoplado que controla el flujo insaturado en medios porosos deformables. Al utilizar un solucionador de elementos finitos, el modelo puede predecir el proceso de infiltración en diversas condiciones, lo cual es muy importante para comprender los problemas de consolidación en suelos no saturados.

8. Modelling the thermal-hydro-mechanical behaviour of unsaturated soils with a high degree of saturation using an extended precise integration method [23].

Este estudio examinó cómo los cambios de temperatura afectan los suelos con alto grado de saturación. Se utilizó un método eficaz para simular el comportamiento en condiciones no isotérmicas, lo que demuestra que las propiedades mecánicas pueden cambiar drásticamente debido a los cambios de temperatura.

9. Thermo-Hydromechanical Coupling Responses Driven by a Central Heat Source in Unsaturated Soils [24].

Se investiga cómo la transferencia de calor y la migración de humedad interactúan en suelos no saturados. Los resultados mostraron que las variaciones en contenido volumétrico de agua son irreversibles y dependen del nivel inicial de saturación, lo que es relevante para

entender procesos como la consolidación bajo condiciones térmicas.

10. Rainfall-triggered slope instabilities under a changing climate: Comparative study using historical and projected precipitation extremes [25].

Para este caso de estudio específico se analizó cómo las precipitaciones extremas causan deslizamientos bajo diferentes escenarios climáticos. La investigación destacó cómo las tasas transitorias de filtración pueden influir en el comportamiento hidromecánico y contribuir a fallas geotécnicas.

Los artículos muestran importantes similitudes en su base teórica, centrándose en el acoplamiento hidromecánico y la influencia de la succión en el comportamiento del suelo, mientras enfatizan la importancia de la saturación en las propiedades mecánicas. Sin embargo, difieren significativamente en sus enfoques metodológicos: algunos investigadores emplean modelos fractales para la permeabilidad [16], otros se centran en la resistencia a la tracción a nivel de partículas [17], y varios incorporan efectos térmicos en sus análisis [23,24]. Los métodos de investigación varían desde modelación numérica, utilizando elementos finitos [22] e integración precisa extendida [23], hasta análisis experimentales que incluyen estudios de permeabilidad [21] y monitoreo de taludes [20]. Incluyen innovaciones teóricas significativas, como la incorporación de conceptos fractales [16] y el acoplamiento termodinámicamente consistente con el Modelo Barcelona [19]. En términos de aplicaciones prácticas, se destacan la evaluación de estabilidad bajo fluctuaciones rápidas de agua [20] y el análisis de riesgos bajo escenarios de cambio climático [25]. Las tendencias emergentes apuntan hacia la integración de múltiples variables (temperatura, saturación, esfuerzo) y el desarrollo de modelos más eficientes computacionalmente, inclinándose a enfoques más complejos que incluyen múltiples factores para facilitar la aplicación práctica de los mismos.

Conclusiones

La revisión de estos diez artículos muestra avances importantes en la última década. Se destacan tres tendencias principales: la inclusión de efectos térmicos en los modelos [24] y [19], el desarrollo de modelos multiescala [17] y la consideración de factores prácticos, como el cambio climático y su efecto en la estabilidad de taludes [25]. Entre las contribuciones metodológicas se encuentran modelos fractales unificados para la permeabilidad [16], métodos precisos para análisis termo-hidro-mecánico [24] y modelos predictivos para infiltración [22]. No obstante, persisten desafíos en la validación experimental de modelos complejos y en la eficiencia computacional. El campo avanza hacia un enfoque más integrado, facilitando el tratamiento de problemas geotécnicos complejos mediante avances en modelado computacional y comprensión física.

Referencias

- [1] H. Rahardjo y D. Fredlund, *An Overview of Unsaturated Soil Behaviour*. 1993.
- [2] «Finite element analysis of deep excavations - ProQuest». Accedido: 29 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.proquest.com/openview/02587a0843f8630884cfe79ef1161148/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- [3] T. T. Wong, D. G. Fredlund, y J. Krahn, «A numerical study of coupled consolidation in unsaturated soils», *Canadian Geotechnical Journal*, ene. 2011, doi: 10.1139/t98-065.
- [4] J. D. Nelson, K. C. Chao, D. D. Overton, y E. J. Nelson, *Foundation Engineering for Expansive Soils*. John Wiley & Sons, 2015.

- [5] C. Chamorro y A. Fernández-Lavín, «Comportamiento esfuerzo-deformación del suelo: Evolución e Importancia», *Investigación y Desarrollo*, vol. 15, p. 130, jun. 2022, doi: 10.31243/id.v15.2022.1597.
- [6] H. A. Chavez, «Modelo constitutivo para suelos no saturados basado en el principio de esfuerzos efectivos», oct. 2015, Accedido: 30 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/770>
- [7] R. I. Borja y J. A. White, «Conservation Laws for Coupled Hydro-mechanical Processes in Unsaturated Porous Media: Theory and Implementation», *Mechanics of Unsaturated Geomaterials, Conservation Laws for Coupled Hydromechanical Processes in Unsaturated Porous Media: Theory and Implementation*, ISTE Ltd. and John Wiley & Sons, Hoboken, NJ 2010, pp. 185-208, LLNL-BOOK-424150, feb. 2010. Accedido: 30 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/992754>
- [8] R. Magaña, R. M. P., «Modelo numérico para estudiar el movimiento de agua en suelos no saturados», 1980, pp. 1-23.
- [9] Bentler, David Jonh, «Finite element analysis of deep excavations - ProQuest». Accedido: 29 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.proquest.com/openview/02587a0843f8630884cfe79ef1161148/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- [10] J. E. Manzolillo, H. A. Di Rado, y A. M. Awruch, «Simulación numérica del comportamiento de suelos saturados bajo cargas de fundaciones», *Proceedings of the Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Resistencia, Argentina*, pp. 9-10, 2000.
- [11] A. Krishnamoorthy, «Consolidation analysis using finite element method», en *Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, 2008*, pp. 1-6.
- [12] H. A. Di Rado, P. A. Beneyto, J. L. Mroginski, J. E. Manzolillo, y A. M. Awruch, «Análisis Tridimensional De La Consolidación De Suelos Saturados Utilizando El Mef.», *Mecánica Computacional*, pp. 607-618, 2004.
- [13] J. M. Duncan y C.-Y. Chang, «Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils», *J. Soil Mech. and Found. Div.*, vol. 96, n.º 5, pp. 1629-1653, sep. 1970, doi: 10.1061/JSFEAQ.0001458.
- [14] N. Inoue, C. Romanel, y D. de Mesquita Roehl, «Análise Pelo Método Dos Elementos Finitos Da Consolidação De Solos Não-Saturados», *Mecánica Computacional*, pp. 473-486, 2006.
- [15] E. Rojas, «Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos no saturados», *Editorial Academica Espanola: Madrid, Spain*, 2011.
- [16] G. Tao, X. Wu, H. Xiao, Q. Chen, y J. Cai, «A UNIFIED FRACTAL MODEL FOR PERMEABILITY COEFFICIENT OF UNSATURATED SOIL», *Fractals*, vol. 27, n.º 01, p. 1940012, feb. 2019, doi: 10.1142/S0218348X19400127.
- [17] H. Arroyo, E. Rojas, J. Y. Moreno-Martínez, O. Palacios, y A. Galván, «Hydromechanical tensile strength modelling at particle size level for non cohesive granular materials», *Computers & Structures*, vol. 292, p. 107242, 2024.
- [18] J. M. Huyghe, E. Nikooee, T. Sweijen, y S. Majid Hassanizadeh, «Two sides of a coin: a critical review, and mathematical and phenomenological study of what we call hydromechanical coupling», en *COUPLED VI: proceedings of the VI*

International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, CIMNE, 2015, pp. 106-115. Accedido: 30 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/191009>

[19] T. Ligurský y Z. Michalec, «On thermodynamically consistent coupling of the Barcelona Basic Model with a hydraulic model for unsaturated soils», *Computers & Structures*, vol. 285, p. 107082, 2023.

[20] J.-Z. Mao, J. Guo, Y. Fu, W.-P. Zhang, y Y.-N. Ding, «Effects of Rapid Water-Level Fluctuations on the Stability of an Unsaturated Reservoir Bank Slope», *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, n.º 1, p. 2360947, ene. 2020, doi: 10.1155/2020/2360947.

[21] G. Cai, Q. Liu, Y. Yang, A. Zhou, y X. Li, «Hydro-mechanical coupling effect on water permeability of intensely weathered sandstone», *Can. Geotech. J.*, vol. 60, n.º 5, pp. 687-700, may 2023, doi: 10.1139/cgj-2022-0113.

[22] M. Liu, X. Feng, L. Zhao, Z. Song, S. Hu, y Z. Dai, «A hydro-mechanical coupling model for predicting infiltration and ponding in unsaturated soils», *J. Cent. South Univ.*, vol. 30, n.º 10, pp. 3435-3449, oct. 2023, doi: 10.1007/s11771-023-5446-x.

[23] L. Wang, P. J. Cleall, B. Zhu, y Y. Chen, «Modelling the thermal-hydro-mechanical behaviour of unsaturated soils with a high degree of saturation using an extended precise integration method», *Can. Geotech. J.*, vol. 60, n.º 1, pp. 86-101, ene. 2023, doi: 10.1139/cgj-2021-0201.

[24] W. Wang, J. Liu, y J. Chen, «Thermo-Hydromechanical Coupling Responses Driven by a Central Heat Source in Unsaturated Soils», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, pp. 1-12, feb. 2022, doi: 10.1155/2022/2867985.

[25] J. D. Robinson, F. Vahedifard, y A. AghaKouchak, «Rainfall-triggered slope instabilities under a changing climate: comparative study using historical and projected precipitation extremes», *Can. Geotech. J.*, vol. 54, n.º 1, pp. 117-127, ene. 2017, doi: 10.1139/cgj-2015-0602.

Aplicación de materiales intensificadores para mejorar la conductividad eléctrica del suelo

Application of grounding enhancement materials to improve soil electrical conductivity

Martínez Ángeles Hugo*, Ríos Moreno José Gabriel**, Velázquez Castillo Rodrigo Rafael**,
Trejo Perea Mario**

*División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México**

*Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México***
oguh_hugo1994@hotmail.com

Palabras clave: ENE, Material Intensificador de Suelo, Sistema de Puesta a Tierra, Eficiencia Eléctrica, Seguridad Eléctrica.

Resumen- La mejora de la conductividad eléctrica del suelo, mediante el uso de Materiales Intensificadores de Suelo (GEM), es un campo de investigación de sumo interés, especialmente en la ingeniería eléctrica. Por otro lado, la resistividad del suelo, que obstaculiza el flujo de electricidad proveniente de descargas eléctricas hacia la tierra, conduce hacia una mitigación inadecuada de los efectos de sobrecarga, lo que repercute en un desempeño deficiente de los Sistemas de Puesta a Tierra (SPT). De esta manera, el objetivo de este artículo es examinar de manera general el estado actual de los GEM reportados en la literatura, para su uso en SPT, centrándose en su composición, así como en la identificación de tendencias emergentes en el desarrollo y aplicación de estos materiales, con el fin de proporcionar una visión integral que oriente a futuras investigaciones en el diseño y la implementación de SPT eficientes y seguros.

Keywords: ENE, Grounding Enhancement Material, Grounding System, Electrical Efficiency, Electrical Safety.

Abstract- Improving the electrical conductivity of soil, by using Soil Enhancement Materials (GEM), is a research field of great interest, especially in electrical engineering. On the other hand, soil resistivity, which hinders the flow of electricity from electrical discharges to the ground, leads to inadequate mitigation of overload effects, which results in poor performance of Grounding Systems (SPT). Thus, the objective of this article is to generally examine the current status of GEMs reported in the literature, for use in GSS, focusing on their composition, as well as identifying emerging trends in the development and application of these materials, in order to provide a comprehensive overview to guide future research in the design and implementation of efficient and safe SPT.

1. Introducción

La conductividad eléctrica del suelo está influenciada de manera notable por diferentes parámetros como la mineralogía, la capacidad de intercambio catiónico, el límite líquido, la superficie específica, la distribución del

tamaño de las partículas y la relación de vacíos, así como por factores ambientales como el contenido de agua, el grado de saturación y la salinidad del agua en los poros [1], [2].

Por otro lado, las características del suelo tienen un efecto considerable sobre las corrientes de falla a tierra y, por lo tanto, en la

eficiencia eléctrica que ocurren en un Sistema de Puesta a Tierra (SPT) [3]. Además, la falta de uniformidad del suelo puede provocar un mayor aumento del potencial, específicamente en los equipos eléctricos y electrónicos [4].

Asimismo, la composición fisicoquímica del suelo desempeña un papel fundamental en el establecimiento de los niveles óptimos de resistencia a tierra, ya que los suelos exhiben distintos comportamientos y propiedades que repercuten en la resistividad general de un SPT [5].

En los suelos arcillosos, la elevada superficie específica proporciona más sitios para que las cargas eléctricas se ubiquen en la superficie de las partículas de arcilla. Debido a esta mayor superficie específica, los suelos arcillosos tienden a tener una mayor conductividad eléctrica en comparación con los suelos de textura gruesa, como la arena, que tienen menos área superficial disponible para que se ubiquen las cargas eléctricas [6].

Por otro lado, la instalación de un SPT puede ser difícil de implementar cuando el suelo tiene una alta resistividad, en estas circunstancias, se prefiere hacer uso de diversos agentes reductores de resistencia a tierra [7].

De esta manera, diversos investigadores [8-15] han introducido técnicas para reducir y mantener la resistencia a tierra en niveles bajos y seguros. Dichas técnicas consisten en la implementación de Materiales Intensificadores de Suelo (GEM), como material complementario al SPT [16].

Un GEM es un material conductor que aborda los desafíos relacionados con la conexión a tierra [17]. Es especialmente efectivo en áreas donde la conductividad eléctrica a tierra es deficiente, como terrenos rocosos, cimas de montañas y suelos arenosos [18]. El GEM disminuye significativamente la resistencia y

la impedancia del suelo, y puede reducir el tamaño del SPT [19].

el objetivo de este artículo es examinar de manera general el estado actual de los GEM reportados en la literatura, para su uso en SPT, centrándose en su composición, así como en la identificación de las tendencias emergentes en el desarrollo y la aplicación de estos materiales, con el fin de proporcionar una visión integral que oriente a futuras investigaciones en el diseño y la implementación de SPT eficientes y seguros.

2. Sistemas de puesta a tierra

Un SPT es una conexión intencional desde un conductor del circuito, por lo general, el neutro, a un electrodo de puesta a tierra colocado en el suelo. Los SPT tradicionales constan de un conjunto de varillas metálicas inmersas en el suelo, mallas y/o barandillas, conectadas a los elementos eléctricos directamente para cerrar un circuito que conduce descargas eléctricas no deseadas a las capas profundas del suelo [20].

Los electrodos de un SPT están orientados vertical y/u horizontalmente para dirigir la mayor parte de la corriente de sobretensión al suelo [21]. Generalmente, el acero y el cobre son los materiales más utilizados para desarrollar una varilla o electrodo para el SPT [22].

Por otro lado, el método popular de conexión a tierra, de un electrodo introducido profundamente en el suelo, todavía se utiliza para aplicaciones domésticas en muchos países [23]. Además, se utiliza la técnica de puesta a tierra ufer, la cual hace uso de la propia estructura metálica de construcciones como edificios de gran altura o torres [24].

La literatura sugiere que, para la protección contra descargas eléctricas, el valor de la resistencia eléctrica de un SPT, debería rondar los 10 Ω [25-27]. Sin embargo, La National

Fire Protection Association (NFPA) [28] y el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), recomiendan un valor de 5Ω o menos [29].

3. Diseño del sistema de puesta a tierra

Es importante contar con un diseño eficiente del SPT (Fig. 1), con el objetivo de que las corrientes de falla puedan disiparse efectivamente a tierra. Por lo cual, existen diferentes técnicas que se pueden encontrar en la literatura [25-27] sobre las investigaciones de los SPT; utilizando mediciones de laboratorio [30], [31] y de campo [32], [33] y también modelos analíticos e informáticos [34-36].

Además, se han realizado diversos estudios sobre algunos aspectos interesantes que involucran el diseño de un buen SPT; los más recientes, se encuentran en diferentes artículos científicos [37-39].

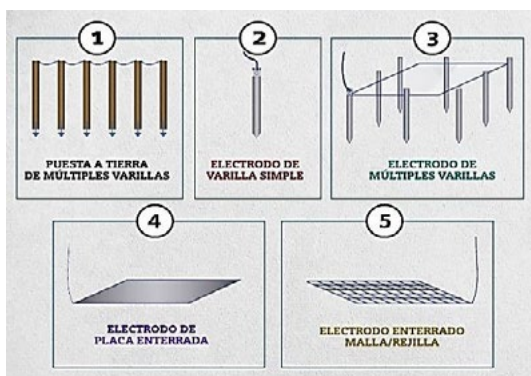


Figura 1. Diversos métodos de diseño de SPT.

No obstante, un SPT simple se compone de un solo electrodo insertado en el suelo (Fig. 2) [40], por lo que emplear un único elemento de puesta a tierra constituye el método más habitual para diseñar un SPT [41].



Figura 2. SPT simple.

Por otro lado, también existen SPT complejos, los cuales comprenden múltiples varillas interconectadas, redes en forma de malla o retícula, placas y lazos (Fig. 3) [42]. Dichos sistemas generalmente se instalan en subestaciones de generación de energía eléctrica, sedes corporativas y emplazamientos de torres celulares.

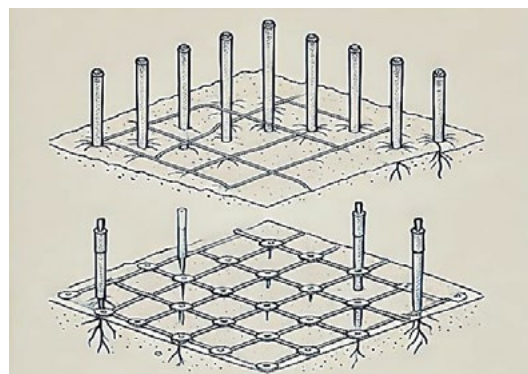


Figura 3. SPT complejos.

De esta manera, para que un SPT resulte eficaz, debería estar diseñado para soportar las peores condiciones posibles; por lo tanto, un diseño correcto, acorde a las necesidades de los equipos interconectados, siempre puede influir en la resistencia final del sistema [43].

4. El GEM como material mejorador de la resistividad del suelo

Un GEM es utilizado comúnmente como mejorador de la capacidad de impedancia de los suelos [44]. Un GEM debe tener ciertas propiedades que permitan mejorar el desempeño del SPT; también, debe ser capaz de retener la humedad del suelo en la zona circundante a la varilla del SPT [45].

Un GEM regularmente se coloca dentro de la zanja donde se instala el electrodo del SPT y se mezcla o sustituye el suelo natural [46].

Actualmente, se puede encontrar en la literatura 3 variantes de GEM estudiados como mejoradores del suelo, los cuales están compuestos por materiales provenientes de agentes naturales, de residuos y químicos [47].

a) Materiales naturales

Los GEM naturales, son aquellos que provienen de productos de desecho agrícola, fuentes renovables, o materiales que se encuentran de manera natural en el planeta; además, estos materiales son considerados amigables con el medio ambiente y de bajo costo [48].

Una ventaja de utilizar materiales naturales como GEM es que éstos no agregan sustancias extrañas al suelo y, por lo tanto, no contaminan el suelo circundante [45].

b) Materiales provenientes de residuos

Los materiales provenientes de residuos, son aquellos que derivan de diversas fuentes, como residuos industriales, residuos urbanos, residuos de construcción y demolición. Se obtienen a partir del tratamiento y procesamiento de residuos sólidos, líquidos o gaseosos con el fin de darles un nuevo uso o reintegrarlos a la cadena productiva [49].

c) Métodos de reducción química

Además de los métodos de reducción de la resistividad con materiales provenientes de fuentes naturales y de los que provienen de

residuos, también existen aquellos métodos considerados artificiales, o químicos [14].

Los métodos químicos, por lo regular hacen uso de productos como: cloruro de sodio, sulfato de magnesio, sulfato de cobre, cloruro de magnesio, cloruro de calcio, cloruro de amonio [50].

5. Resultados y discusión

Con base en los 3 tipos de materiales utilizados como compuestos para la elaboración de distintos tipos de GEM, se muestra la Tabla 1, la cual presenta a manera de resumen los resultados más sobresalientes de algunos artículos revisados en este documento.

La información se divide de acuerdo a los 3 tipos de GEM que se han estudiado, mencionando los materiales, los resultados principales y las limitaciones.

De esta manera, diversos investigadores han utilizado diversos materiales provenientes de fuentes naturales, de residuos y químicos como GEM para mejorar la resistividad del suelo.

Se puede observar cómo, mediante el uso de diversos GEM, especialmente aquellos con propiedades como elevada higroscopia o propiedades eléctricas intrínsecas se obtienen resultados que ayudan a reducir la resistividad del suelo.

De esta manera, la conductividad eléctrica de los GEM permite optimizar el desempeño de los SPT al mejorar la conductividad en áreas cercanas al electrodo de tierra, esto reduce la resistencia total del sistema, garantiza una dispersión de la corriente de falla más rápida y contribuye a la seguridad y confiabilidad de las instalaciones eléctricas.

Por otro lado, en algunas investigaciones se comenta que sería conveniente realizar pruebas de desgaste de las muestras ante

condiciones climáticas, ya que algunos factores como la lluvia o el sol pueden tener implicaciones en la calidad de los GEM.

Tabla 1. Materiales utilizados como GEM en la literatura.

Autor (es)	Materiales Utilizados	Resultados Principales	Limitación
Materiales naturales			
[10]	Zeolita, perlita, vermiculita	La zeolita destaca como la mejor opción para mejorar la retención de humedad del suelo.	La perlita tiene baja densidad aparente. - La vermiculita tiene baja porosidad.
[45]	Polvo de arroz, suelo arcilloso, turba de fibra de coco	Suelo arcilloso más eficiente. Resistividad del SPT varió entre 33 y 24 Ω .	Se necesita estudio a largo plazo para una comparación justa con GEM comercial.
[11]	Arcilla china, arena de sílice y bentonita	Arena de sílice y bentonita muestra un valor de voltaje de ruptura alto y pueden descargar las cargas de manera fácil y eficiente, ya que esta obtuvo un valor de 24.96 Ωm .	Uso de bentonita condiciona los resultados de las mezclas. Además, solo se hizo la simulación del SPT.
[8]	Bentonita, estiércol de cerdo, amalgama de carbón con sal doméstica	Estiércol de cerdo produjo el mejor resultado, la resistividad varía de 74.94 Ωm a 8.26 Ωm , seguido de la bentonita, 9.25 Ωm y la sal con el carbón, 10.87 Ωm .	Estiércol de cerdo material natural más eficiente, pero se descompone con el tiempo, sal doméstica se filtra y el carbón por sí solo no logra los mejores resultados.
[12]	Aceite de nuez de palma, suelo	Estabilidad en ácidos y álcalis. Resistividad del suelo se redujo en un 73%.	Reducción del efecto de resistividad en temporada de lluvias.
Materiales provenientes de residuos			
[9]	Cenizas de carbón y yeso (residuos industriales)	Combinación óptima (70% ceniza de carbón, 15% suelo arenoso, 15% yeso)	Se recomienda realizar más pruebas con diferentes diseños de mezclas y durante periodos de tiempo más largos.
[7]	Cenizas volantes, cemento y sal	Cenizas volantes redujeron la resistividad del suelo en un 35% ya que paso de 22.81 Ωm a 14.83 Ωm .	Se recomienda realizar más diseños de mezcla para encontrar mejores resultados.
[13]	Grafito y carbón activado	Resistividad de agregados con grafito y carbón fue de 49.20 y 185 Ωm , lo cual fue superior a los 12.70 Ωm de GEM comerciales.	La combinación de grafito y carbón activado mejoró el comportamiento de la resistividad eléctrica pero no a valores aceptables.
Métodos de reducción química			
[15]	Polvo de óxido metálico, piedra caliza, cloruro de sodio, bentonita, limadura de hierro y polvo de granito	Polvo de óxido metálico el más eficiente.	Ambientalmente no amigable, debido a la erosión y la contaminación del suelo.
[14]	Cloruro de sodio, tiosulfato de sodio, cloruro de magnesio, sulfato de cobre y cloruro de amonio	Cloruro de sodio como el mejor material, cloruro de amonio deficiente en comparación con GEM comerciales.	Al ser productos químicos, su uso ambiental se consideraría poco viable.
[46]	Materiales químicos en polvo y concreto	El compuesto hecho a base de concreto mostró mejor comportamiento que el concreto.	El proyecto debe llevarse a cabo durante 2 años más.

6. Conclusiones

La conductividad eléctrica de los GEM está directamente relacionada con el funcionamiento eficiente de los SPT, ya que el uso correcto de estos materiales determinará la capacidad del SPT mejorar la eficiencia y seguridad del sistema.

Estos materiales se utilizan para mejorar la conductividad del suelo alrededor de los electrodos, reduciendo la resistividad del suelo y, por lo tanto, facilitando la dispersión de corrientes eléctricas.

De esta manera, la revisión realizada en este artículo, destaca el uso de diversos materiales para mejorar la eficiencia de los SPT. Se mencionan 3 tipos de materiales, los cuales provienen de fuentes naturales, químicas o de residuos.

En cuanto a los materiales naturales, la investigación destaca a estos como la opción más amigable con el medio ambiente. Sin embargo, diversos autores mencionan que dichos materiales no son del todo recomendables, a menos que se mezclen con arcillas como la bentonita, debido a la pérdida de su eficiencia a corto plazo.

Por otro lado, en términos de eficacia se destaca el uso de materiales químicos por sus mejores resultados; sin embargo, se debe considerar las implicaciones que tiene el uso de estos materiales, tales como la corrosión de los electrodos o la contaminación de los micro ecosistemas circundantes.

Finalmente, se hace mención de materiales procedentes de desechos, los cuales son una buena opción para lograr reducir la resistividad del suelo. Se recomienda el uso de aquellos que provienen de fuentes de desecho de carbón, como la ceniza volante o el grafito.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración a cada uno de los autores involucrados en la escritura de este artículo, así como a la Universidad Autónoma de Querétaro y al CONAHCYT, por el apoyo brindado para el estudio de posgrado.

Referencias

- [1] H. Ko, H. Choo, and K. Ji, "Effect of temperature on electrical conductivity of soils – Role of surface conduction," *Eng. Geol.*, vol. 321, p. 107147, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107147>.
- [2] H. Choo, J. Song, W. Lee, and C. Lee, "Effects of clay fraction and pore water conductivity on electrical conductivity of sand-kaolinite mixed soils," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 147, pp. 735–745, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.009>.
- [3] C. Cheng, J. Teng, G. Xu, H. Wei, and C. Geng, "Modelling polarization effect in electrical conductivity of frozen soil," *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 218, p. 104075, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.104075>.
- [4] M. Hajian and A. A. Razi-Kazemi, "High frequency analysis of grounding system using FIT approach," 2017 25th Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2017, pp. 1355–1359, 2017, doi: [10.1109/IranianCEE.2017.7985252](https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2017.7985252).
- [5] B.-S. SEO et al., "Soil texture affects the conversion factor of electrical conductivity from 1:5 soil-water to saturated paste extracts," *Pedosphere*, vol. 32, no. 6, pp. 905–915, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.023>.
- [6] B. Nekhou, B. Harrat, A. Boutadjine, and M. Melit, "A simplified numerical modeling of the transient behavior of grounding systems considering soil ionization," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 211, p. 108182, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108182>.
- [7] S. Der Chen, C. K. Cheng, L. H. Chen, and J. F. Chen, "An experimental study on the electrical properties of fly ash in the grounding system," *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst.*, vol. 7, no. 2, pp. 1–19, 2006, doi: [10.2202/1553-779X.1284](https://doi.org/10.2202/1553-779X.1284).
- [8] F. . Opara, O. . Nduka, N. . Iloka, P. . Amaizu, and O. M.A, "Comparative deterministic analysis of bentonite, pig dung and domestic salt and charcoal amalgam as best resistance reducing agent for electrical earthing applications," *Internasional J. Sci. Eng. Res.*, vol. 5, no. 10, pp. 575–584, 2014, [Online]. Available: onyema.nduka.2014@ieee.org

- [9] M. G. Pedroza et al., "The use of coal ash and plaster waste to improve grounding system," *J. Clean. Prod.*, vol. 264, p. 121504, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121504.
- [10] W. L. Lai, W. F. H. Wan Ahmad, J. Jasni, and M. Z. A. Ab Kadir, "A review on the usage of Zeolite, Perlite and Vermiculite as natural enhancement materials for grounding system installations," *IEEE Student Conf. Res. Dev. Inspiring Technol. Humanit. SCOREd 2017 - Proc.*, vol. 2018-Janua, pp. 338–343, 2017, doi: 10.1109/SCORED.2017.8305368.
- [11] R. Ahmad et al., "Simulation and breakdown characteristics of china clay and silica sand for improved grounding system," *2nd Int. Conf. Electr. Commun. Comput. Eng. ICECCE 2020*, no. June, pp. 12–13, 2020, doi: 10.1109/ICECCE49384.2020.9179377.
- [12] G. Eduful, J. E. Cole, and F. M. Tetteh, "Palm Kernel Oil Cake as an alternative to earth resistance-reducing agent," *2009 IEEE/PES Power Syst. Conf. Expo. PSCE 2009*, pp. 1–4, 2009, doi: 10.1109/PSCE.2009.4840017.
- [13] M. Y. M. Tadz, T. H. H. T. Anuar, F. M. Yahaya, and R. A. Rahman, "Performance of Graphite and Activated Carbon as Electrical Grounding Enhancement Material," in *Proceedings of the 11th National Technical Seminar on Unmanned System Technology 2019*, Z. Md Zain, H. Ahmad, D. Pebrianti, M. Mustafa, N. R. H. Abdullah, R. Samad, and M. Mat Noh, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2021, pp. 1139–1154.
- [14] W. Ahmad, A. Rahman, M. Z. A. Jasni, A. Kadir, and Hizam, "Chemical Enhancement Materials for Grounding Purpose," *Int. Conf. Light. Prot. - ICLP*, vol. 2010, pp. 11061–11066, 2010.
- [15] C. Gomes, Z. Kadir, S. Lim, and C. Kottachchi, "Industrial wastes and natural substances for improving electrical earthing systems," *Int. J. Electr. Eng.*, vol. 21, pp. 39–47, 2014, doi: 10.6329/CIEE.2014.2.01.
- [16] I. A. Jamieson, "Grounding (earthing) as related to electromagnetic hygiene: An integrative review," *Biomed. J.*, vol. 46, no. 1, pp. 30–40, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bj.2022.11.005>.
- [17] H. L. Yan, "Research on the mechanism of grounding resistance-reducing agent and the used quantity," pp. 1230–1233, 1991, doi: 10.1109/icpadm.1991.172302.
- [18] W. F. H. W. Ahmad, K. H. Tan, M. Z. A. Ab Kadir, and J. Jasni, "Performance of Sodium Chloride Bentonite and Conductive Cement as Grounding Enhancement Materials," in *2015 Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2015)*, 2015, pp. 23–27.
- [19] M. Camara, F. Atalar, and A. E. Yılmaz, "A new grounding cake to improve the safety performance of grounding systems," *J. Electrostat.*, vol. 108, no. September, p. 103521, 2020, doi: 10.1016/j.elstat.2020.103521.
- [20] F. R. A. Bukit and M. Hidayat, "Analysis of the Effect of Addition of Bentonite Zeolite Bunch Ash and Coconut Kernel Oil as Earthing Media," in *2023 7th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, 2023, pp. 218–223, doi: 10.1109/ELTICOM61905.2023.10443150.
- [21] J. H. Li, Z. Lu, L. B. Guo, and L. M. Zhang, "Experimental study on soil-water characteristic curve for silty clay with desiccation cracks," *Eng. Geol.*, vol. 218, pp. 70–76, 2017, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.01.004.
- [22] N. Mohamad Nor, R. Rajab, and Z. Othman, "Validation of the earth resistance formulae using computational and experimental methods for gas insulated sub-station (GIS)," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 290–294, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.04.056.
- [23] A. Haddad, D. F. Warne, and Institution of Engineering and Technology., *Advances in high voltage engineering. Institution of Engineering and Technology*, 2009.
- [24] S. C. Lim, C. Gomes, and M. Z. A. Ab Kadir, "Electrical earthing in troubled environment," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 117–128, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.10.058.
- [25] W. Bin, D. Xinzhou, B. Zhiqian, and A. Klimek, "Analysis of MHO ground relay against to earth resistance in ultra-high-voltage transmission line application," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, no. 1, pp. 490–494, 2007, doi: 10.1109/UPEC.2007.4468996.
- [26] M. F. Attia, "Interpretation of time-domain induced polarization and resistivity data for Earth modeling," *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. 4, pp. 2499–2501, 1994, doi: 10.1109/igarss.1994.399780.
- [27] Z. Stojkovic, M. S. Savid, J. M. Nahman, S. Member, D. Salamon, and B. Bukorovic, "【PEEC复现冲击接地实验】 Analysis of Experimenting Grid Impuls," *Trans. Power Deliv.*, vol. 13, no. 4, pp. 1136–1142, 1998.
- [28] J. A. Petersen, *National fire protection association standards in fire litigation*. Elsevier Inc., 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-813240-1.00011-X.
- [29] IEEE Std 81, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System Sponsored by the Substations Committee IEEE Power and Energy Society*, vol. 2012, no. December. 2012.
- [30] N. M. Nor, A. Haddad, and H. Griffiths, "Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, pp. 353–361, 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.852352.
- [31] "Impulse and 60-cycle characteristics of driven

- grounds — II,” *Electr. Eng.*, vol. 61, no. 6, pp. 446–448, 2013, doi: 10.1109/ee.1942.6436370.
- [32] Z. Zhang et al., “Study on Transient Impact Characteristics of Grounding Grid in UHV Converter Station and Its Influencing Factors,” 2018 Int. Conf. Power Syst. Technol. POWERCON 2018 - Proc., pp. 3272–3282, 2019, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8601841.
- [33] N. Harid, “Experimental Investigation of Impulse Characteristics of Transmission Line Tower Footings,” *J. Light. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 36–44, 2012, doi: 10.2174/1652803401204010036.
- [34] A. Geri, G. M. Veca, E. Garbagnati, and G. Sartorio, “Non-linear Behaviour of Ground Electrodes Under Lightning Surge Currents: Computer Modelling and Comparison with Experimental Results,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 2, pp. 1442–1445, 1992, doi: 10.1109/20.123966.
- [35] M. Trlep, A. Hamler, M. Jesenik, and B. Stumberger, “The FEM-BEM analysis of complex grounding systems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 3 I, pp. 1155–1158, 2003, doi: 10.1109/TMAG.2003.810201.
- [36] A. Habjanic and M. Trlep, “The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 867–870, 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.871625.
- [37] N. Mohamad Nor, S. Abdullah, R. Rajab, and Z. Othman, “Comparison between utility substation and imitative earthing systems when subjected under lightning response,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 156–161, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.04.042.
- [38] N. Mohamad Nor, M. Trlep, S. Abdullah, and R. Rajab, “Investigations of earthing systems under steady-state and transients with FEM and experimental work,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 758–763, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.031.
- [39] N. Mohamad Nor, S. Abdullah, R. Rajab, and K. Ramar, “Field tests: Performances of practical earthing systems under lightning impulses,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 45, no. 1, pp. 223–228, 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.077.
- [40] K. Park, K. Kim, K. Kim, and W.-T. Hong, “Characterization of active layer at different degrees of patterned ground development using electrical resistivity tomography survey,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 208, p. 103734, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103734>.
- [41] S. Georges and F. Slaoui, “Modelling and simulation of heat dissipation due to HVDC ground electrodes using the finite element method,” in 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), 2014, pp. 476–480, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2014.6873838.
- [42] G. Dove, “Concepts require flexible grounding,” *Brain Lang.*, vol. 245, p. 105322, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2023.105322>.
- [43] M. Popov, L. Grčev, H. K. Høidalen, B. Gustavsen, and V. Terzija, “Power system grounding and its effect on surrounding components,” in *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, J. García, Ed., Oxford: Elsevier, 2023, pp. 99–112, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00133-1>.
- [44] Comité Consultivo Nacional de Normalización de Instalaciones Eléctricas [CCNNIE], “Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización),” vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2012.
- [45] L. K. S. Jasni, M. Z. A. A. K. Ahmad, and W. F. Wan, “30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010 NATURAL MATERIALS AS GROUNDING FILLER natural material , bentonite , lightning protection , grounding fillers , grounding impedance .,” *Power Eng.*, vol. 2010, p. 6, 2010.
- [46] E. G. E. Arturo Galvan D., Gilberto Pretelln G, “Practical Evaluation of Ground Enhancing Compounds for,” 30th Int. Conf. Light. Prot. - ICLP 2010, vol. m, pp. 3–6, 2010.
- [47] M. Abida, F. Gehring, J. Mars, A. Vivet, F. Dammak, and M. Haddar, “Effect of hygroscopy on non-impregnated quasi-unidirectional flax reinforcement behaviour,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 128, pp. 315–322, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.008>.
- [48] P. Y. . Okyere and G. Eduful, “Reducing earth electrode resistance by replacing soil in critical resistance area,” *J. Mod. Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–10, 2006.
- [49] Y. Wang, X. Huang, S. Zhang, W. Ma, and J. Li, “Utilization of ultrafine solid waste in the sustainable cementitious material for enhanced performance,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 417, p. 135239, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135239>.
- [50] Anonim, Guide for Safety In AC Substation Grounding Based on Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE std 80:2000). 2000.

Diseño y simulación de partes a través de sistemas CAD-CAM

Design and simulation of parts through CAD-CAM systems

Lira Hernández Ivan Alonso*, Arroyo Barranco Cesar Alfonso
Área Académica de Ingeniería y Arquitectura del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca de Soto, Hidalgo. México
*ilira@uaeh.edu.mx

Palabras clave: Diseño, CAM, CNC, Ingeniería, Innovación.

Resumen- Actualmente los procesos de enseñanza aprendizaje y capacitación sobre diversas áreas y/o disciplinas del conocimiento como por ejemplo las ciencias de la salud, ciencias de la educación; y las diversas ingenierías como, por ejemplo: manufactura, industrial, mecánica y mecatrónica. Frecuentemente y con mayor normalidad se llevan a cabo en primer lugar distintas simulaciones sobre los procesos de manufactura antes de llevarlos a la práctica, y esto es debido a que una de las razones principales es en primer lugar evitar errores o accidentes en la maquinaria CNC y herramientas a utilizar.

Además de que al momento de diseñar las piezas a maquinar es posible facilitar o dificultar las diferentes trayectorias de mecanizado siendo necesario considerar la ingeniería concurrente. Otra de las ventajas que tiene la simulación es la posibilidad de considerar y buscar la optimización de los maquinados donde evidentemente la exactitud de las partes y componentes a manufacturar dependerá de una adecuada simulación a través de software asistido por computadora y de la habilidad del operador de la máquina para considerar los mismos parámetros de la simulación, aunque en la realidad algunas veces resulta complicado por el simple hecho que en ocasiones no se tienen las mismas máquinas herramientas y también por el simple hecho de que las configuraciones teóricas algunas veces no corresponden a las reales o prácticas. Sin embargo, cada día las simulaciones están muy cerca de la realidad y seguramente conforme avance la ciencia y la tecnología se llegará al punto donde ya no sea necesario realizar ningún ajuste y solo se mande a maquinar con un solo clic.

Keywords: Design, CAM, CNC, Engineering, Innovation.

Abstract- Recently the process of teaching and learning and training over diverse knowledge areas or disciplines how by example the health science, education science and the various engineering how by example: manufacturing, industrial, mechanic and mechatronic every instant and major normal are held at first place different simulations about the manufacturing process before are held practice, this to one reason main is the avoid errors and dangerous in the CNC machinery and tools to use.

Besides that, at the moment of design the parts to machining it is possible facility or difficult the different trajectory of mechanized being necessary to consider concurrent engineering. Other of the advantage that have the simulation is the possibility of consider the same parameters of the simulation although at the reality sometimes result complicate for the simple fact what in occasions, they do not have each other the same tool machine and too for the simple fact of the configurations theories sometimes do not correspond to the reals or practice. However, every day the simulations are very close of the reality and surely conform advance the science and the technologies it will reach the point where it is no longer need to make any adjustments and only to send to machine with one click.

1. Introducción

Las tecnologías avanzadas asistidas por computadora (CAX) se centran en resolver problemas específicos aumentando la creatividad y la innovación humana obtenidas mediante la recopilación, el uso y el intercambio de información entre equipos interdisciplinarios. Las tecnologías asistidas por computadora en el campo X son términos generales para definir una tecnología, de un campo específico de trabajo, asistido por computadora [1].

Ciertamente un diseñador de ingeniería practica el diseño según esa definición, pero también lo hace un artista, un escultor, un compositor, un dramaturgo o cualquier otro miembro creativo de nuestra sociedad. Así, aunque los ingenieros no son las únicas personas que diseñan cosas, es cierto que la práctica profesional de la ingeniería se ocupa en gran medida del diseño; a menudo se dice que el diseño es la esencia de la ingeniería [2]. Diseñar es crear algo nuevo o arreglar cosas existentes de una nueva manera para satisfacer una necesidad reconocida de la sociedad.

El diseño es el estado inicial en todos los procesos de diseño y una de sus actividades principales es trasladar los requerimientos del cliente en especificaciones de ingeniería, así como analizar, verificar y evaluar un número de alternativas para elegir la mejor. [3]

La simulación de cualquier tipo de análisis, llámese estático, térmico o incluso de cualquier disciplina o campo de estudio, por ejemplo: médico, ambiental o hasta deportivo, entre otros, es posible desarrollarse a través de algún software de diseño asistido por computadora, mejor conocido como CAD, por sus siglas en inglés. [4]

En este trabajo se desarrolló la simulación de diversos tipos de mecanizados a través de diferentes softwares de sistemas CAD/CAM, con el propósito de analizar e identificar cuáles son los programas que permiten lograr desarrollar no solo la simulación, sino que permita lograr un maquinado a partir de una menor configuración o adaptación del mismo a la máquina, en otras palabras, con la finalidad de disminuir la edición o configuración del programa en la máquina de CNC.

La industria manufacturera actual depende en gran medida de los métodos de simulación para el diseño y desarrollo de partes y/o productos, los procesos de manufactura y las pruebas de materiales. Esto se debe a que las simulaciones brindan resultados de una manera más segura, rápida y económica en comparación con una configuración física.

La implementación de herramientas de Interfaz de Programación de Aplicaciones, (API) por sus siglas en inglés, en los sistemas modernos de Diseño Asistido por Computadora (CAD) han sido utilizadas por investigadores, ingenieros y diseñadores desde la invención de CAD. se utilizan para simulaciones de mecanizado, con el fin de aumentar la productividad y la eficacia de las máquinas CNC. [5]

Los sistemas de simulación se emplean para reflejar en tiempo real el mundo físico en un modelo virtual para pruebas, optimización e interacción.

1.1 Planteamiento del Problema

Actualmente existen una gran cantidad de simuladores para poder representar los procesos de mecanizados sin embargo cada uno de ellos tiene sus respectivas ventajas o desventajas, por lo que es necesario saber hacer una selección apropiada puesto que algunos de ellos permiten generar el código G de manera muy rápida como por ejemplo en el caso particular del SolidCAM que es un complemento del SolidWorks, sin embargo en algunos casos el código G generado requiere una mayor configuración para dejarlo listo para su posible maquinado, mientras que en otros casos como por ejemplo el software de Mastercam no genera de forma automática el código G pues depende de cómo hagamos la asignación y selección de los procesos pero con la ventaja de que una vez generado el código G no requiere de muchos cambios para poder obtener el programa o código G final para maquinar.

Existen diferentes softwares para CAD-CAM y simuladores de CNC, los cuales permiten poder diseñar y simular procesos de manufactura, en particular los maquinados, los cuales pueden seleccionarse de acuerdo a las necesidades o en base al planteamiento que se desea ejecutar, por ejemplo: si es necesario generar desde el diseño, lo recomendable es emplear CAD/CAM. En caso de que ya se tenga el diseño de una pieza con sus respectivas dimensiones se puede pensar en la programación directa a través del Control Numérico Computarizado.

1.2 Tipos de Software

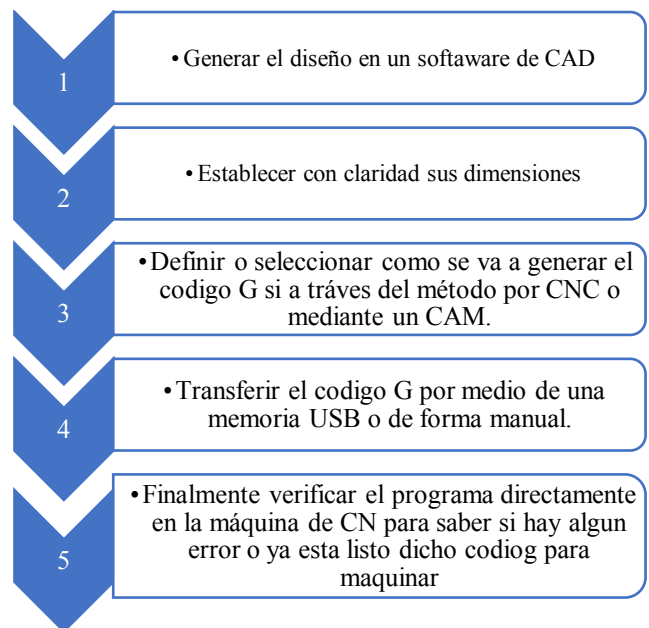
Para el caso en donde se pretende emplear el CAD/CAM, es posible utilizar como software el SolidWorks para desarrollar toda la parte de CAD, aunque es posible poder generar el CAM, siempre y cuando se cuente con el complemento de SolidWorks CAM. También es posible desarrollar el CAD-CAM a través del software de Mastercam donde es posible

realizar tanto el CAD como el CAM, sin embargo, en algunas ocasiones es más conveniente emplear el SolidWorks para Diseñar la pieza y posteriormente importarla en el Software de Mastercam para poder asignar las operaciones de mecanizado y posteriormente generar el código G.

Otro software que existe en la actualidad es el Fusión 360, el cual permite trabajar tanto con el CAD y CAM de forma simultánea. Finalmente existen otros programas como por ejemplo el WinUnisoft en sus diferentes versiones hasta la versión más plus donde se puede generar el código G para posteriormente teclearlo línea por línea en la máquina de Control Numérico Computarizado. Para el caso del sistema CAD/CAM es posible grabar el código G y M en una memoria USB, para posteriormente importarlo a la máquina sin necesidad de escribirlo bloque por bloque.

1.3. Metodología

Los pasos a desarrollar se muestran en el siguiente diagrama de bloques, donde se pueden observar cada uno de los pasos que se tienen que implementar para poder diseñar, simular y maquinar una parte o pieza.



A continuación, se muestran diferentes ejemplos de diseño y simulación. La figura 1 muestra una pieza con sus respectivas dimensiones en mm, donde se puede apreciar con claridad que la longitud máxima de la pieza es de 75mm y 19.05mm de diámetro máximo.

Para mecanizado en material de aluminio o en latón para trabajar en una máquina torno, donde se pueden emplear desde una hasta cinco operaciones diferentes con una o tres herramientas distintas, y una de ellas fue una con mango para torneado de acero con un inserto recubierto por deposición química con carburo de titanio, alúmina y nitruro de titanio.

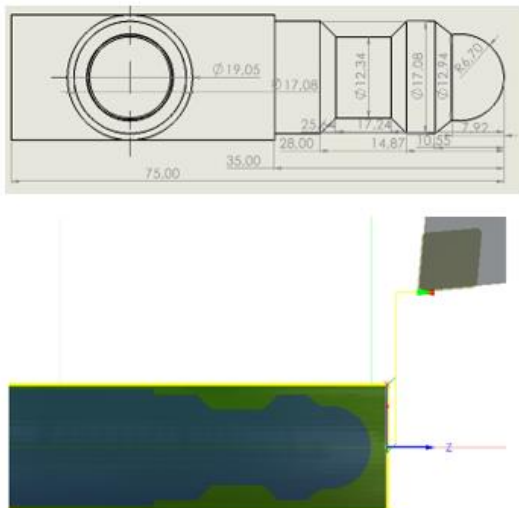


Figura 1. Ejemplo CAD de Pieza para Torno CNC en Software Fusión 360

El software Fusión 360 permite generar el modelo de la pieza en 3D, y una vez que se tiene generado el CAD, el siguiente paso es trabajar en el módulo CAM para realizar la simulación de maquinado como se muestra en la siguiente figura 2, donde evidentemente se puede apreciar que ya se llevó a cabo la simulación del maquinado, sin embargo, se puede observar que todavía no fue posible obtener exactamente el diseño original.



Figura 2: Ejemplo CAM de Pieza para Torno CNC en Software Fusión 360

La diferencia que existe entre el diseño CAD y la simulación CAM, se debe en primer lugar al uso de herramienta la cual todavía no es la más apropiada por lo que se debe continuar buscando la herramienta más adecuada, de no encontrarla se tendrá que buscar la forma de configurar una nueva herramienta o la otra solución que se puede implementar es empleando una operación de ranurado.

Nuevamente se presenta el mismo diseño de la pieza 3D para proceso de mecanizado en una máquina torno de control numérico. Pero ahora el diseño se realizó en otro software.

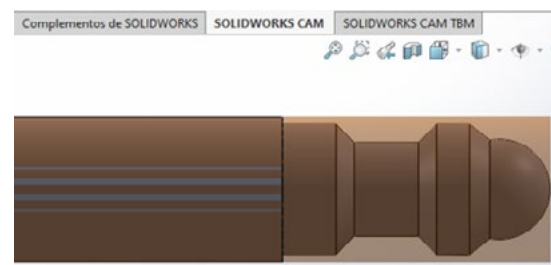


Figura 3. Ejemplo CAD de Pieza para Torno CNC en Software SolidWorks 2023

Una vez que se tiene la pieza diseñada el siguiente paso es generar todos los pasos del CAM requeridos para poder llegar a la simulación de maquinado como se aprecia en la siguiente figura 4.

Se puede observar que la pieza que se ha simulado ya es muy cercana a la diseñada, sin embargo, con el proceso de acabado y con ese tipo de herramienta no es suficiente lograr la pieza deseada, por lo que la recomendación es llevar a cabo otra operación de ranurado para poder lograr el maquinado de acuerdo al diseño generado.

En la figura 5. Ya es posible tener la misma pieza diseñada y simulada, siendo posible a través del empleo del software Mastercam, gracias a la implementación de la operación que se recomendó en la figura 4.

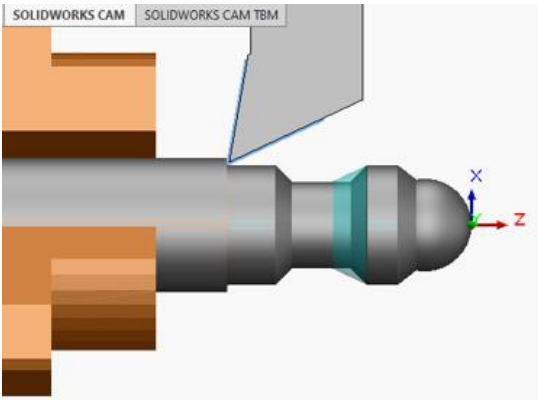


Figura 4. Ejemplo CAM de Pieza para Torno CNC en Software SolidWorks 2023

La presente investigación permite demostrar que el código G, puede ser generado por diversos softwares de CAM, como fue demostrado en el presente trabajo, puesto que se emplearon tres, los cuales fueron: Fusión 360, SolidWorks CAM y Mastercam X7.

Es importante mencionar que la importancia no es la comparación de software, ya que cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas, además de que cada uno tiene su propia especialización. La importancia de utilizar diferentes softwares ha permitido encontrar que el proceso de manufactura puede ser posible con cualquiera de los tres, pero al momento de generar todo el proceso de diseño y el proceso de manufactura; es posible manifestar que tanto en Fusión 360 como en

SolidWorks CAM, dichos procesos se generan con facilidad, pero para poder llegar a maquinar la configuración es más complicada mientras que en el software Mastercam X7 la generación del código G para maquinar es rápido y efectivo.

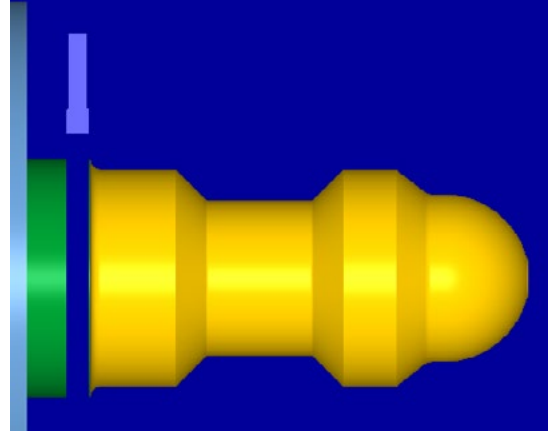


Figura 5. Ejemplo CAM de Pieza para Torno CNC en Software Mastercam

Resultados y discusión

Después de realizar las simulaciones anteriores en diversos programas o software es posible comentar que son diversos los parámetros que se deben configurar y a pesar de ser muy similares cada software tiene sus ventajas y desventajas. Además de que se puede argumentar que cada uno tiene cierta especialización o facilidad, por ejemplo.

Para el caso de Fusión 360 permite generar con rapidez la pieza o modelo 3D, pero cuando se está trabajando en la parte del CAM es más complicado cuando no cuentas con las herramientas que desees, pero como todo, en la medida que vas dando de alta tus propias herramientas puede ser más rápido.

En lo que respecta al SolidWorks y SolidWorks CAM se tiene una gran versatilidad tanto para el CAD como para el CAM.

Conclusiones

Gracias al desarrollo de un diseño fue posible generar diversas simulaciones de maquinado mediante distintos softwares de CAD-CAM. Donde evidentemente los tres permiten generar un sistema CAD/CAM, porque en un solo programa se puede trabajar ambos, pero algunas veces se hacen combinaciones de los mismos, por ejemplo, hay algunos programadores y operadores de máquinas que prefieren diseñar en SolidWorks y después importar el diseño al Mastercam para que en este último generen todo el CAM.

También algunas veces no se tiene ningún programa o computadora para diseñar y es cuando se puede apreciar la importancia de generar el código G y M, mediante CNC. En la actualidad una de las innovaciones es la existencia de software que permiten generar todo en uno, en otras palabras, quiere decir que en un solo programa se puede generar el diseño, la ingeniería asistida por computadora en caso de ser necesaria que se le conoce como CAE, por sus siglas en inglés, y finalmente el CAM.

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación ha sido gracias al apoyo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura. Laboratorio de Manufactura.

Referencias

- [1] Lira Hernández, I. A., Ramírez, R., & Barrientos Hernández, F., “Uso de las CAX en el Diseño-Ingeniería Industrial y su Impacto en la Industria 4.0”. no.18 pp. 35-39, 2022.
- [2] Dieter, G., & Schmidt, L. “Engineering Design”. USA: McGraw-Hill. no. 2013
- [3] Lira Hernández, I. A., “Sistema Híbrido para asistir los procesos de diseño de ingeniería hacia la Industria 4.0”, CDMX: UAM. 2022
- [4] Lira Hernández, I. A., & Ramírez, R. “Simulación sobre una viga en voladizo de forma tubular a través de un análisis estático”. Tecnología y Diseño, no. pp.49-59.2021.
- [5] Panagiotis, K., & Davim, P. “Experiments and Simulations in Advanced Manufacturing” Switzerland: Springer. 2021.

Modelo de Brus para el análisis del confinamiento cuántico en puntos cuánticos de ZCIS

Brus Model for Quantum Confinement Analysis in ZCIS Quantum Dots

*Mora-Muñoz J. Moroni, Guerra-Balcázar M., Ramos-Castillo C.M.,
Rodríguez-Morales J.A., Álvarez A., C. Guzmán**

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas s/n,
76010 Santiago de Querétaro, Mexico

Contact: cguzman@uaq.mx

Palabras clave: Puntos cuánticos, ZCIS, modelo de Brus

Resumen- Los puntos cuánticos (QDs) semiconductores, particularmente los de Zn-Cu-In-S (ZCIS), han ganado gran atención en la investigación en nanotecnología debido a sus propiedades optoelectrónicas únicas, las cuales difieren significativamente de las de sus contrapartes en estado masivo. En este estudio, se utilizó el modelo de Brus para analizar el efecto del confinamiento cuántico en las energías de banda prohibida de los QDs de ZCIS. Nuestros resultados demuestran la precisión del modelo al replicar de manera cercana los valores de banda prohibida del material masivo a medida que el tamaño de los puntos cuánticos se aproxima al radio de Bohr teórico. Además, se observó un incremento significativo en la energía de banda prohibida al reducir el tamaño de los puntos cuánticos, validando así el modelo de Brus para estos sistemas. Los puntos cuánticos sintetizados exhibieron una absorción óptica alrededor de los 403 nm, mostrando una clara relación inversa entre el tamaño de los QDs y su banda prohibida, consistente con el efecto de confinamiento cuántico. Mediante la aplicación sistemática del modelo de Brus, esta investigación valida su pertinencia para los QDs de ZCIS y destaca su potencial como una herramienta rentable para estimar el tamaño de los puntos cuánticos. Además, los resultados subrayan la importancia de condiciones de síntesis precisas para ajustar las propiedades ópticas de los QDs de ZCIS, brindando información valiosa para el diseño y desarrollo de nanomateriales adaptados a aplicaciones específicas.

Keywords: Quantum dots, Brus model, ZCIS

Abstract- Semiconductor quantum dots (QDs), especially Zn-Cu-In-S (ZCIS), have attracted considerable attention in nanotechnology research due to their unique optoelectronic properties, which are very different from those of their bulk counterparts. In this study, the Brus model was used to analyze the effects of quantum confinement on the bandgap energies of ZCIS QDs. Our results show that the model very accurately reproduces the bandgap values of the bulk material as the size of the quantum dots approaches the theoretical Bohr radius. In addition, a significant increase in band gap energy was observed as the size of the quantum dots decreased, confirming the Brus model for these systems. The synthesized quantum dots exhibited optical absorption around 403 nm. This shows a clear inverse relationship between the size of the QDs and their bandgap, which is consistent with the quantum confinement effect. By systematically applying the Brus model, this research validates its relevance to ZCIS QDs and highlights its potential as a cost-effective tool for estimating quantum dot sizes. Furthermore, the results emphasize the importance of precise synthesis conditions for tuning the optical properties of ZCIS QDs and provide valuable insights for the design and development of nanomaterials tailored to specific applications.

1. Introducción

En los últimos años, los puntos cuánticos (QDs) semiconductores han ganado una atención significativa debido a sus

propiedades optoelectrónicas únicas, las cuales difieren notablemente de las de sus contrapartes en estado masivo debido al efecto de confinamiento derivado de su dimensionalidad reducida. El efecto de confinamiento cuántico se presenta cuando el movimiento de los portadores de carga se restringe a dimensiones pequeñas (≈ 10 nm), comparables al radio de Bohr del material, lo que altera las propiedades electrónicas y ópticas del sistema [1]. Entre estos materiales, el Zn-Cu-In-S (ZCIS) destaca por su banda prohibida ajustable y su alto coeficiente de absorción, lo que lo convierte en un candidato prometedor para dispositivos fotovoltaicos, tecnología LED y aplicaciones biomédicas.

Los modelos teóricos proporcionan un marco para comprender y predecir los cambios en las propiedades ópticas en función del tamaño de partícula en puntos cuánticos semiconductores. Entre estos modelos, el propuesto por Brus (1984) ofrece un enfoque cuantificable para determinar las variaciones en la energía de banda prohibida con el tamaño del material, convirtiéndolo en una herramienta valiosa para el diseño y optimización de puntos cuánticos [2].

A pesar del potencial del ZCIS, la literatura no reporta ampliamente la aplicación de modelos teóricos, como el de Brus, en este material, debido a los desafíos que plantea su complejidad composicional y su naturaleza iónica.

Este trabajo tiene como objetivo llenar el vacío en la aplicación del modelo de Brus a los puntos cuánticos de ZCIS, buscando proporcionar una comprensión más profunda de los efectos de confinamiento cuántico en este material.

2. Metodología

A. Modelo teórico utilizado para la simulación

Este estudio utiliza un modelo de pozo cuadrado finito para estimar cómo el confinamiento cuántico afecta la banda prohibida de los puntos cuánticos. El modelo ha sido adaptado específicamente para considerar las características de las nanopartículas de Zn-Cu-In-S (ZCIS). La metodología se basa en el modelo propuesto por Omata et al. [3]. Este enfoque es fundamental para comprender cómo el confinamiento cuántico influye en las propiedades electrónicas del material.

$$W=(H_L-E_g)/2 \quad (1)$$

Los principales factores utilizados en el modelo son las masas efectivas de los electrones y huecos en las bandas de conducción y valencia (m_c y m_v , respectivamente), la banda prohibida del material masivo (E_g), y la diferencia de energía entre los niveles HOMO y LUMO de la molécula ligante (H_L) (Ecuación 1). Estos parámetros son fundamentales, ya que afectan directamente las características del pozo de potencial y se obtienen a partir de datos empíricos específicos para las nanopartículas de ZCIS.

Usando Python como entorno de programación, empleamos la librería numpy para gestionar grandes arreglos y realizar operaciones matemáticas de manera eficiente. Además, utilizamos la librería scipy para operaciones con matrices dispersas y cálculos de autovalores, los cuales son esenciales para resolver la ecuación de Schrödinger en un espacio discretizado. Para representar la matriz hamiltoniana del sistema, implementamos el método de diferencias finitas en un espacio unidimensional discretizado, definido por los parámetros $x_{\min}$ y $x_{\max}$ sobre una malla de 2000 puntos.

El modelo empleado en este análisis altera dinámicamente el tamaño de los puntos cuánticos (L) en un rango de 10 a 200 radios de Bohr, con incrementos de 5 radios de Bohr para simular diferentes escenarios de confinamiento. Para cada tamaño, se define un pozo de potencial, y el potencial fuera del pozo se determina mediante la Ecuación (1), que representa el potencial de barrera en unidades atómicas de Hartrees.

El núcleo del análisis computacional implica el cálculo de los autovalores para los estados del electrón y del hueco utilizando la matriz hamiltoniana dispersa. Los autovalores más bajos corresponden a las energías del estado fundamental para los electrones y huecos, las cuales se convierten de Hartrees a electronvolts para su relevancia práctica. La banda prohibida para cada tamaño de punto cuántico se estima calculando la diferencia de energía entre los estados fundamentales del electrón y el hueco, midiendo así directamente el efecto del confinamiento cuántico en la banda prohibida.

Este análisis ofrece una visión integral de cómo el confinamiento cuántico influye en las propiedades ópticas de las nanopartículas de ZCIS, abarcando las bandas prohibidas calculadas para diferentes tamaños de puntos cuánticos. Estos resultados son esenciales para adaptar la síntesis y aplicación del ZCIS en varios dominios tecnológicos.

B. Síntesis y caracterización de los puntos cuánticos de ZCIS

El proceso de formación de los puntos cuánticos de ZCIS se llevó a cabo mediante un método hidrotermal. Los precursores catiónicos utilizados en el proceso fueron

acetato de zinc, yoduro de cobre y acetato de indio, todos a una concentración equimolar de 0.42 mmol. La molécula ligante utilizada fue el ácido mercaptopropiónico (MPA), fijado a 5.04 mmol, y la tiourea se empleó como fuente de azufre en la misma concentración que los precursores catiónicos. La temperatura de síntesis se varió desde 140°C con incrementos de 10°C hasta 180°C.

Después de la síntesis, el material fue purificado y se obtuvieron los espectros de absorción UV-Vis utilizando un espectrofotómetro Thermo Scientific Genesys G-10S UV-Vis. Para determinar la banda prohibida óptica de los materiales resultantes, se aplicó el método de Tauc, cuyos resultados se utilizaron en un modelo para estimar el tamaño de los puntos cuánticos. El análisis elemental del material se realizó utilizando un equipo Bruker S2 PICOFOX.

3. Resultados y discusión

El modelo mostró una discrepancia sustancial en los valores de la banda prohibida entre el material masivo y los puntos cuánticos a medida que el diámetro del material disminuye. Además, se observó un notable incremento en la energía de la banda prohibida conforme disminuye el tamaño del material, lo cual concuerda con los valores esperados según el modelo [4].

El modelo también presenta valores de banda prohibida similares a los del material masivo a medida que aumenta el tamaño, con una variación del 1.28% a 9.5 nm y del 1.11% a 10.3 nm en comparación con la banda prohibida del material masivo. Para el radio de Bohr teórico (13.4 nm), la diferencia entre la banda prohibida del material masivo y la de los puntos cuánticos es solo del 0.42%, lo que sugiere un ajuste adecuado del modelo en comparación con los valores reportados para el material Figura 1.

Establecida la consistencia del modelo con la literatura existente, se determinó la variación de la banda prohibida óptica utilizando los espectros de absorción obtenidos de los materiales sintetizados. Estos materiales exhibieron absorción alrededor de una longitud de onda de 403 nm, con variaciones en función de las diferentes temperaturas de síntesis. Se empleó el método de Tauc, una técnica precisa, para determinar la banda prohibida indirecta óptica de los materiales [5], como se detalla en la Tabla 1.

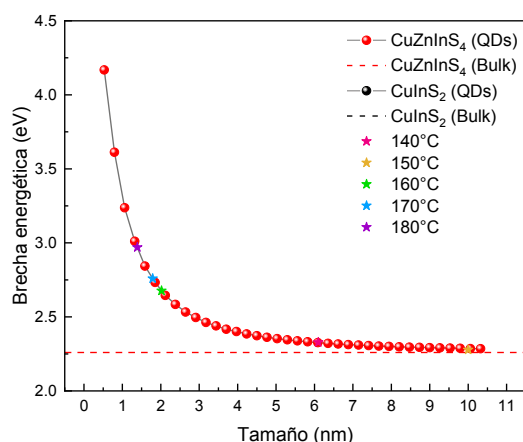


Fig. 1. Modelo de Brus para los puntos cuánticos de ZCIS con MPA como ligante, mostrando la comparación entre las bandas prohibidas calculadas para los puntos cuánticos y el material masivo, así como los datos ajustados de la banda prohibida óptica calculada del material en relación con su tamaño teórico correspondiente.

Los datos obtenidos de la banda prohibida muestran una variación que se sugiere estar directamente relacionada con la dimensionalidad del material, dado que la concentración de los cationes se mantuvo fija y no deberían observarse variaciones significativas en la concentración del producto. Por lo tanto, se propone que la variación en la banda prohibida del material está directamente ligada a la variación dimensional del mismo.

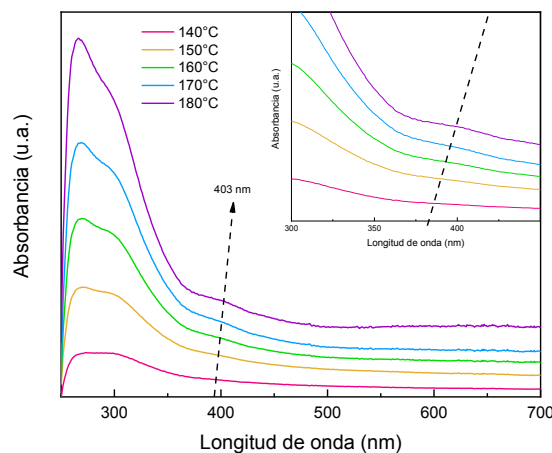


Fig. 2. Espectros de absorción de los puntos cuánticos sintetizados mediante variación de temperatura.

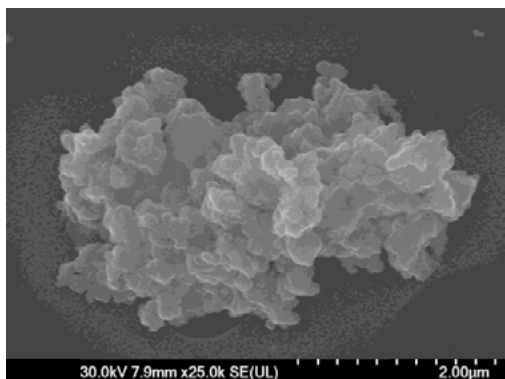
Tabla 1. Determinación del tamaño de los puntos cuánticos de ZCIS mediante el modelo de Brus

Tamaño calculado de acuerdo con el modelo de Brus		
Temperatura (°C)	Brecha energética (eV)	Tamaño de partícula (nm)
140	2.328	6.1
150	2.567	2.463
160	2.677	2.02
170	2.759	1.79
180	2.97	1.39

Una vez que se calculó la banda prohibida de los materiales, estos valores se introdujeron en el modelo, y se estimó el tamaño de los puntos cuánticos de acuerdo con los resultados obtenidos, los cuales se presentan en la Tabla 1.

Los resultados de los tamaños calculado con el modelo (Figura 1) presentados en la Tabla 1 muestran una disminución en el tamaño de las partículas a medida que aumenta la temperatura de síntesis, lo cual es consistente con las expectativas teóricas. La temperatura influye en los procesos de cristalización, redisolución y crecimiento de los materiales [6], [7].

(a)



(b)

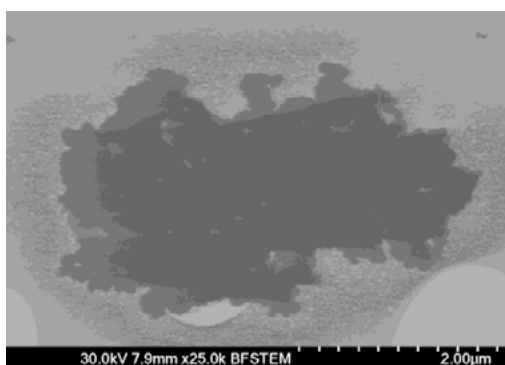


Fig. 3. Imagen de Microscopía Electrónica de Transmisión de Barrido (STEM) de puntos cuánticos de ZCIS con MPA, mostrando la aglomeración de los nanocristales, (a) campo oscuro y (b) campo claro.

La relación inversa observada entre el tamaño de las partículas, la banda prohibida y la temperatura de síntesis no solo valida el modelo de confinamiento cuántico, sino que también subraya el potencial para manipular las propiedades ópticas de los materiales a través de las condiciones de síntesis, como la temperatura. Este hallazgo tiene implicaciones significativas para la ciencia de materiales y la nanotecnología, ofreciendo nuevas oportunidades para el diseño y desarrollo de materiales avanzados con propiedades ópticas ajustadas.

La Figura 3 muestra una imagen preliminar de Microscopía Electrónica de Transmisión de Barrido (STEM), proporcionando un vistazo

de los puntos cuánticos recubiertos con MPA (Figura 2).

La micrografía revela un alto grado de aglomeración entre los puntos cuánticos (Fig. 3 (a)); sin embargo, los alrededores exhiben un sistema más disperso, lo que sugiere una morfología más homogénea. Las partículas dispersas muestran una delgada capa translúcida, que puede atribuirse al recubrimiento con ligante (Fig. 3 (b)).

Otro factor que considerar es la relación molar entre los cationes que constituyen el material, ya que un cambio en la proporción de cationes modifica los estados electrónicos del sólido. El Cu introduce más estados cerca de la banda de valencia, afectando el máximo de la banda de valencia y reduciendo la banda prohibida. Por otro lado, los átomos de Zn suprimen los estados de Cu, lo que resulta en un ensanchamiento de la banda prohibida. Finalmente, los cationes de In reducen el mínimo de la banda de conducción, disminuyendo la banda prohibida del material. Por lo tanto, la composición elemental fue determinada mediante espectroscopía de fluorescencia de rayos X. Los espectros y la composición del material obtenido se muestran en la Figura 4 y la Tabla 2.

El modelo de Brus describe el efecto de confinamiento cuántico en los nanocristales semiconductores, donde la banda prohibida aumenta a medida que disminuye el tamaño de las partículas. Sin embargo, en la síntesis experimental de materiales como InP o ZCIS, las desviaciones de las relaciones molares ideales de los cationes (por ejemplo, Zn, Cu, In) pueden conducir a variaciones que afectan al sistema más allá de las predicciones del modelo de Brus. Si la relación molar experimental de los cationes difiere de la estequiometría teórica, el material resultante puede presentar dopaje no intencionado, defectos cristalinos o cambios en la composición de fase, lo que a su vez altera los

estados electrónicos y, por lo tanto, la banda prohibida efectiva.

Por ejemplo, un exceso de Cu puede aumentar la densidad de huecos y desplazar el máximo de la banda de valencia, reduciendo la banda prohibida, incluso en nanocristales donde el confinamiento cuántico predeciría teóricamente un ensanchamiento de la banda prohibida. En contraste, un exceso de Zn puede suprimir la formación de defectos superficiales, restaurando o ampliando aún más la banda prohibida. Estas condiciones experimentales no ideales alteran la relación entre el tamaño de las partículas y la banda prohibida que predice el modelo de Brus, lo que genera discrepancias en las que la banda prohibida observada experimentalmente no corresponde directamente al tamaño del cristal debido a desequilibrios químicos. Por ello, una estequiometría precisa de los cationes es esencial para garantizar que los resultados experimentales concuerden con las predicciones teóricas del modelo de Brus.

Aunque la micrografía proporciona un indicador de la dimensionalidad y el recubrimiento con ligantes de los puntos cuánticos de ZCIS, es necesario un análisis más detallado mediante Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) para investigar con mayor precisión el tamaño y la morfología de los materiales. Esto nos ayudaría a corroborar aún más el modelo propuesto.

El modelo de Brus ha sido aplicado a los puntos cuánticos de ZCIS, y los resultados obtenidos confirman las predicciones teóricas al mismo tiempo que destacan el potencial de los enfoques de síntesis personalizados para ajustar las propiedades del material. Estos hallazgos son particularmente significativos, ya que demuestran la capacidad única de manipular las condiciones de síntesis, como la temperatura, para controlar el tamaño de los puntos cuánticos e influenciar las energías de

su banda prohibida. Esta capacidad es fundamental para ajustar las propiedades ópticas de los puntos cuánticos y satisfacer las necesidades tecnológicas específicas en diversas aplicaciones de alta tecnología.

Además, la precisión consistente del modelo de Brus al reflejar los cambios en el efecto de confinamiento cuántico con diferentes tamaños de partículas sugiere su potencial como una herramienta confiable para el diseño y optimización de nanomateriales. Estos resultados proporcionan una base sólida para futuras investigaciones en la síntesis y aplicación de puntos cuánticos de ZCIS.

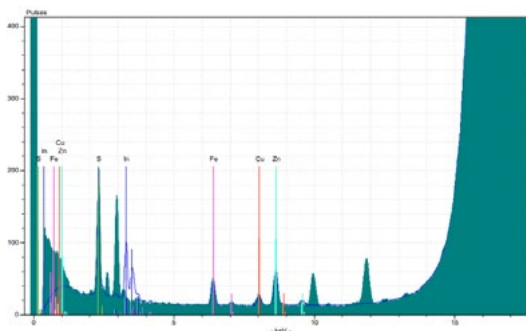


Fig. 4. Espectro de los puntos cuánticos obtenidos a través de XRF.

Z	Conc. (µg/l)	Relación molar teórica	Relación molar experimental
S	41.504	NA	NA
Fe	1	Blanco	Blanco
Cu	0.134	3	3
Zn	0.323	7.5	7.028
In	0.628	7.5	7.781

Para mejorar la precisión predictiva de los modelos, es fundamental profundizar en estos resultados preliminares mediante la incorporación de análisis de Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM) de alta

resolución. Estos estudios permitirán refinar nuestra comprensión de la morfología de los puntos cuánticos y la efectividad del recubrimiento con ligantes. Además, la exploración de parámetros de síntesis variables contribuirá a ampliar las aplicaciones prácticas de los puntos cuánticos de ZCIS en los campos de la nanotecnología y la ciencia de materiales. Al hacerlo, se podrá potenciar el impacto y la utilidad de los puntos cuánticos de ZCIS en el desarrollo de materiales avanzados.

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo de Brus a los puntos cuánticos de ZCIS no solo son coherentes con las predicciones teóricas, sino que también destacan el potencial único de los enfoques personalizados de síntesis para ajustar con precisión las propiedades del material. Los datos muestran que, al manipular las condiciones de síntesis, en particular la temperatura, es posible controlar eficazmente el tamaño de los puntos cuánticos e influenciar las energías de la banda prohibida. Esta capacidad es esencial para adaptar las propiedades ópticas de los puntos cuánticos y satisfacer las necesidades tecnológicas específicas en diversas aplicaciones de alta tecnología.

4. Conclusión

Este estudio ha utilizado eficazmente el modelo de Brus para demostrar la influencia del confinamiento cuántico en la energía de la banda prohibida de los puntos cuánticos (QDs) de ZCIS. Nuestros resultados confirmaron una clara relación inversa entre el tamaño de los QDs y su banda prohibida a medida que aumenta la temperatura de síntesis. Esta tendencia es consistente con las predicciones teóricas y destaca la precisión del modelo al replicar el comportamiento del confinamiento cuántico.

Aunque el modelo de Brus proporciona una base sólida para comprender el efecto de

confinamiento cuántico en puntos cuánticos semiconductores complejos, requiere refinación adicional para predecir con precisión las propiedades electrónicas en sistemas donde juegan un papel importante los defectos de dimensión cero y las variaciones en la concentración de cationes. Estos factores generan estados localizados en la estructura de bandas, afectando las bandas de valencia y conducción de forma independiente del tamaño de las partículas. Además, las variaciones en la estequiometría de los cationes pueden provocar dopajes no deseados, atrapamiento superficial y separación de fases, modulando la banda prohibida y la dinámica de los portadores más allá de lo que contempla el modelo de Brus.

Sin embargo, la precisión del modelo de Brus al simular los efectos de confinamiento cuántico subraya su potencial para comprender y predecir las propiedades de estos materiales. La fuerte correlación entre la banda prohibida y el tamaño de las partículas con la temperatura de síntesis valida la relevancia del modelo. Esto sugiere que el modelo podría perfeccionarse para utilizarse como una alternativa rentable a métodos más costosos, como la microscopía electrónica de transmisión (TEM), para determinar el tamaño de las partículas a través de sus propiedades ópticas.

La investigación futura debería centrarse en validar el tamaño de partícula calculado mediante el modelo de Brus utilizando otras técnicas, como TEM o dispersión de luz dinámica (DLS). Además, el modelo debe mejorarse aún más para tener en cuenta la composición variable de los cationes o el impacto de los defectos en la estructura cristalina.

Agradecimientos

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por el apoyo financiero brindado para sus estudios de doctorado.

Referencias

- [1] W. A. A. Mohamed *et al.*, “Quantum dots synthetization and future prospect applications,” *Nanotechnol Rev*, vol. 10, no. 1, [6] pp. 1926–1940, Jan. 2021, doi: 10.1515/NTREV-2021-0118/ASSET/GRAPHIC/J_NTREV-2021-0118_FIG_013.JPG.
- [2] S. T. Harry and M. A. Adekanmbi, “CONFINEMENT ENERGY OF QUANTUM DOTS AND THE BRUS EQUATION,” *International Journal of Research - [7] GRANTHAALAYAH*, vol. 8, no. 11, pp. 318–323, Dec. 2020, doi: 10.29121/GRANTHAALAYAH.V8.I11.2020.2451.
- [3] T. Omata, K. Nose, and S. Otsuka-Yao-Matsuo, “Size dependent optical band gap of ternary I-III-VI₂ semiconductor nanocrystals,” *J Appl Phys*, vol. 105, no. 7, Apr. 2009, doi: 10.1063/1.3103768/396696.
- [4] T. Aubert *et al.*, “General Expression for the Size-Dependent Optical Properties of Quantum Dots,” *Nano Lett*, vol. 22, no. 4, pp. 1778–1785, Feb. 2022, doi: 10.1021/ACS.NANOLETT.2C00056/SUPPL_FILE/NL2C00056_SI_001.PDF.
- P. Makuła, M. Pacia, and W. Macyk, “How To Correctly Determine the Band Gap Energy of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV-Vis Spectra,” *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 9, no. 23, pp. 6814–6817, Dec. 2018, doi: 10.1021/ACS.JPCLETT.8B02892/SUPPL_FILE/JZ8B02892_LIVESLIDES.MP4.
- P. A. Ajibade, L. P. Mona, and S. P. Songca, “Effects of Reaction Temperature and Time on Structural, Morphological and Optical Properties of Magnetite Quantum Dots Prepared by Solvothermal Method,” *J Inorg Organomet Polym Mater*, vol. 34, no. 2, pp. 690–702, Feb. 2024, doi: 10.1007/S10904-023-02841-3/FIGURES/10.
- J. Y. Rempel, M. G. Bawendi, and K. F. Jensen, “Insights into the kinetics of semiconductor nanocrystal nucleation and growth,” *J Am Chem Soc*, vol. 131, no. 12, pp. 4479–4489, Apr. 2009, doi: 10.1021/JA809156T/SUPPL_FILE/JA809156T_SI_001.PDF.

Revisión del impacto del uso de enmiendas orgánicas en la producción de fitoquímicos

Mini review on the impact of the use of organic amendments on the production of phytochemicals

Estrada-Pérez, Jeniffer Giovanna; Feregrino- Pérez, Ana Angélica
Facultad de Ingeniería Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México
jestrada12@alumnos.uaq.mx

Palabras clave: BIO, composta, enmiendas orgánicas, fitoquímicos, fertilizantes, microorganismos, rendimiento de cultivo.

Resumen- Las enmiendas orgánicas -EO son materiales derivados de organismos vivos que se incorporan al suelo mejorando su composición. Su uso se ha incrementado debido a la necesidad de prácticas agrícolas más sostenibles en el cultivo de alimentos. Los tipos de enmiendas más comunes son las que provienen del compost de estiércol de animales, harinas de diferentes tipos y de biosólidos municipales, estos aportan nutrientes esenciales mejorando la estructura del suelo. El impacto de las EO es significativo. Por un lado, aumentan la actividad biológica del suelo, esto resulta en una mejor retención de agua para las plantas y mayor absorción de nutrientes impactando positivamente en la producción de metabolitos secundarios. A su vez, esto permite obtener cultivos más robustos y resistentes a plagas y enfermedades. Además, reemplazar fertilizantes inorgánicos por EO contribuye a una agricultura Sustentable. Sin embargo, su implementación también presenta desafíos, como la necesidad de una correcta gestión para evitar problemas de patógenos y el equilibrio adecuado de nutrientes. Este estudio se centra en una pequeña revisión del impacto que tienen diferentes tipos de EO en cultivos principalmente de orden alimenticio, identificar sus ventajas y desventajas, así como revisar la literatura relativa a los fitoquímicos más analizados.

Keywords: BIO, compost, organic amendments, phytochemicals, fertilizer, microorganisms, crops yield.

Abstract- Organic amendments are material derived from living organisms that are incorporated into soil, improving its composition. Its use has increased due to the need for more sustainable agricultural practices in growing food. The most common types of amendments are those that come from animal manure compost, flours of different types and municipal biosolids, these provide essential nutrients, improving the structure of the soil. The impact of the organic amendments is significant. On the one hand, they increase the biological activity of the soil, this results in better water retention for plants and greater absorption of nutrients, positively impacting the production of secondary metabolites. In turn, this allows for more robust crops that are resistant to pests and diseases. Furthermore, replacing inorganic fertilizers with organic amendments contributes to sustainable agriculture. However, its implementation also presents challenges, such as the need for correct management to avoid pathogen problems and the proper balance of nutrients. This study focuses on a small review of the impact that different types of organic amendments have on mainly food crops, identifying their advantages and disadvantages, as well as reviewing the literature related to the most analyzed phytochemicals.

1. Introducción

El interés en el uso de ingredientes naturales en diversas áreas ha aumentado de manera considerable debido a la creciente desconfianza en los antioxidantes o químicos

sintéticos por parte del consumidor. Las tendencias actuales se enfocan en el uso de ingredientes de origen vegetal que dan una seguridad y confianza mayor al consumidor en productos alimenticios y de cuidado personal. Los compuestos químicos provenientes de las plantas o fitoquímicos son de gran importancia para la salud y el bienestar del ser humano [1]. Desde las moléculas más básicas como sus almidones, proteínas y grasas, que proveen la base de alimentación humana, hasta moléculas orgánicas tan complejas que sirven para el alivio de nuestras dolencias y para mantener la salud humana. Uno de los usos de las plantas que tienen un gran impacto en la vida de los seres humanos, es utilizarlas para realizar productos terapéuticos y cosméticos que permiten enriquecer la vida de las personas y ayudan a cumplir una función cultural [2]. Las EO para el suelo se refieren a aquellos materiales que aportan carbón y nutrientes a los microorganismos del suelo. Estos materiales en su mayoría son clasificados como desperdicios o subproductos de otras cadenas productivas que pueden ser reincorporados mediante un tratamiento como el compostaje, la combustión o su aplicación directa [3]

En México las EO se encuentran reguladas por la norma NMX-AA-180-SCFI-2018 “que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales.”[4]

Adicionalmente, las EO tienen un efecto benéfico en la estructura, biología y resiliencia de los suelos agrícolas [5]. El desarrollo de paquetes técnicos de cultivos alternativos, como lo son aquellos que tienen utilidad para la cosmética, que contemplen EO serán benéficos para la preservación de suelos, que en México 44% exhiben un alto grado de degradación [6]

Los medios fisiológicos que hacen que una planta pueda acumular fitoquímicos de interés para el hombre son más o menos conocidos [7]. Muchos de estos han sido comprendidos como respuestas al estrés hídrico, a la abundancia o falta de algún elemento nutricional, al fotoperiodo, al potencial genético o los tratamientos agronómicos. Bien, investigaciones recientes han expandido la comprensión de las interacciones de la planta con su medio ambiente, y con ello la producción de fitoquímicos [8].

Estas investigaciones se han realizado principalmente alrededor de cultivos cuyo uso es alimentario, y con la principal intención de averiguar si la forma en que tratamos nuestros cultivos tiene efecto sobre sus cualidades nutricionales, más específicamente probando las diferencias nutricionales entre alimentos que se producen de forma convencional y orgánica.

El objetivo del presente trabajo fue llevar a cabo una revisión de la literatura acerca de los estudios más recientes de EO; conocer su impacto en los cultivos, identificar los beneficios, así como los posibles efectos negativos, identificar los fitoquímicos más analizados y las EO existentes. Principalmente, se recopilaron las metodologías y las conclusiones que se han hecho hasta el momento sobre el impacto de las EO en la producción de fitoquímicos para proveer una base de estandarización de futuros estudios y se detectaron oportunidades para incluir variables que ayuden a explicar el efecto de las EO en los cultivos.

2. Metodología

Se realizó una revisión de la literatura mediante el buscador académico de Google (Google Scholar). Se buscaron artículos relacionadas con las palabras claves establecidas en inglés : “organic amendment”,

“benefits in plants and soil”, “phytochemicals”.

Para seleccionar la literatura relevante para el trabajo, se establecieron los siguientes criterios: (1) el periodo de búsqueda que se estableció el rango del 2015-2024; (2) Uso de las palabras clave de manera combinada “organic amendment”, “benefits in plants and soil”, “phytochemicals”.

Se excluyeron artículos que no considerarán dentro de su estudio la medición de metabolitos secundarios, también se excluyeron las mediciones puramente cualitativas y artículos repetidos encontrados en el buscador, dando un número total de artículos de 23.

3. Resultados y discusión

Los diseños experimentales de las investigaciones consultadas (n= 23) principalmente contemplan como factor, un tipo de enmienda orgánica, y un contraste contra fertilizantes sintéticos en dosis comerciales de fertilización. Dos estudios contemplan la inoculación de un microorganismo[9,10]. De los artículos consultados, 20 se refieren a plantas comestibles y tres a medicinales[11–13]. En cinco estudios se tienen como sujetos de estudio a más de una especie[7,12,14–16]. También, en las investigaciones, se contemplan uno o varios ciclos de producción[17,18]. Solamente tres contemplan el uso de distintas variedades o cultivares de la misma especie como factor[14,18,19]. Y otros dos miden el estrés hídrico como factor bien otros utilizan variables de respuesta como cantidad de agua consumida y la eficiencia de uso de agua[20,21].

Igualmente, la mayoría (n=16) de los estudios contemplan la medición de características como la altura de las plantas, el índice de área foliar, y el peso final del producto o masa seca

de tejidos de la planta. Únicamente un estudio mide la aceptación de consumidores finales sobre el producto [18].

Los estudios principalmente se centran sobre la cuantificación de sustancias fenólicas, capacidad antioxidante, flavonoides, betacarotenos y vitamina C. La cuantificación de las sustancias fenólicas invariablemente se realizó por métodos espectrofotométricos usando como referencia el ácido gálico y tratando las muestras de tejido seco en reactivo de Folín- Ciocalteu. Para la cuantificación de la capacidad antioxidante de las especies evaluadas hay varias metodologías usadas, por ejemplo, el uso del 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) que consiste en el tratamiento de la muestra con el reactivo, y su posterior contraste contra una curva de una muestra de trolox, que es un análogo de vitamina E. Igualmente, se encontró que en otras especies se utilizó como método de cuantificación el potencial de reducción de hierro por el plasma, utilizando como reactivo 2,4,6-tris-2,4,6-tripiridyl-2-triazine (TPTZ) y cloruro de hierro. Para la cuantificación de carotenos y otros subproductos los métodos utilizados fue la cromatografía HPLC.

Hablando del efecto de las EO sobre la producción de fitoquímicos, los resultados han sido diferentes entre especies como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Impacto de enmiendas orgánicas en producción de fitoquímicos en diferentes especies vegetales reportados en artículos seleccionados

Cultivo	Impacto	Positivo/ Negativo	Referencia
Frambuesa	Impacto	+	[22]
Alcachofa	Impacto	+	[23]
Orégano	Impacto	+	[16]
Tomate	Impacto	+	[9]

Zanahoria	No impacto		[18]
Brócoli	Impacto	+	[24]
Albaricoque	Inconcluso		[25]
Caupí	Impacto	+	[26]
Fresa	Impacto	+	[27]
Salvia	Impacto	+	[16]
Manzanilla	Impacto	+	[28]
Espinaca	No impacto		[29]
Acelga	Impacto	+	[30]
Arugula	Impacto	+	[14]
Nabo	Impacto	+	[14]
Mostaza	Impacto	+	[14]

Al revisar los datos obtenidos, se observa la tendencia de los artículos en la medición de ciertos parámetros, la mayoría se concentra en analizar actividad antibacteriana y capacidad antioxidante. Otros de los compuestos más analizados son los flavonoides, los carotenoides y fenoles. Sobre los incrementos en su contenido el efecto es muy claro en la mayoría de los estudios sin importar el tejido medido, se destaca que en el caso de la tallos de mostaza que se probaron simultáneamente con tratamientos de EO provenientes de estiércol de pollo, caballo y desechos municipales hubieron incrementos en los 31%-90% en el contenido de vitamina C en contra de cultivos que fueron únicamente fertilizados de manera química; igualmente en el caso de los fenoles totales en el mismo cultivo los incrementos fueron de entre 36% y 77%, siendo el estiércol de caballo el que dio menores rendimientos, aunque las dosis fueron calculadas para aportar la misma cantidad de nitrógeno [14]. Una cualidad importante del estudio demostró que el incremento de los fitoquímicos fue neto, ya que los vegetales cultivados con enmiendas orgánicas

incrementaron el peso por unidad, sin importar la variedad.

Es importante contrastar estos resultados con los obtenidos en zanahoria [18], donde al controlar por fertilidad inicial del suelo se concluyó que no son las enmiendas orgánicas las que por su aplicación incrementan el contenido de fitoquímicos, sino que hay variedades que tienen mayor potencial de acumulación tanto de minerales como de metabolitos secundarios. De la misma manera, este estudio hace mención que en términos de contenido nutricional la actividad biológica del suelo, la fertilidad y el contenido de P tienen mayor efecto en la acumulación de fitoquímicos en la zanahoria.

Una conclusión similar se llegó en un estudio realizado sobre frambuesa [19] en donde los efectos en el perfil químico de la fruta se vieron más influenciados por la variedad, que por las prácticas agronómicas utilizadas. Bien, en tomate evaluando el usar una EO más la inoculación de un organismo, todos los tratamientos incorporando inoculación fueron más efectivos en el incremento del contenido de fenoles en la planta que la EO sola 34% y 36% que solo la EO y la fertilización química respectivamente [9]. Aunque no fue el mismo comportamiento con otros metabolitos, lo que sugiere que hay una interacción compleja entre los microorganismos, EO y rutas moleculares específicas para algunos metabolitos secundarios. Dentro de los estudios revisados se mostró una tendencia en los parámetros analizados que se muestra en la figura 1:



Figura 1. Parámetros con mayor frecuencia de medición

Por otro lado, las enmiendas más utilizadas en los artículos seleccionados recientemente se muestran en la figura 2:



Figura 2. Tipos de enmiendas orgánicas encontradas

Las EO aportan nutrientes tanto en el suelo como en el cultivo y contribuye con la producción de otros nutrientes propios de la planta y del suelo. Sin embargo, existen ciertas preocupaciones que limitan su uso y que hay que seguir investigando. Por ejemplo, la relación costo beneficio, cuando se evalúa en términos comparativos con otras fuentes de nutrientes, (0-25%)[29] su relativo bajo contenido de nitrógeno pueden dejarlas fuera de precio contra otros fertilizantes nitrogenados (20-46%)[23]. Adicionalmente, los balances específicos de nutrientes son

difíciles de controlar y altamente variables entre proveedores por lo que esto puede aumentar el riesgo de sobre fertilizar o interferir con que la planta aproveche otros nutrientes, igualmente esto sucede con otras características como el pH, la estabilidad y el contenido de sales[14]. En la figura 3 se muestran las principales ventajas y desventajas que se presentan en la literatura revisada con respecto al uso de enmiendas orgánicas.

Figura 3. Ventajas y desventajas de las enmiendas orgánicas, fuente: (3)



4. Conclusiones

Este trabajo muestra una revisión de la literatura con respecto a las EO y su efecto en la producción de fitoquímicos en las plantas. Los resultados indican que las EO son una solución prometedora para la agricultura sostenible debido al impacto positivo de su aplicación tanto en planta como en el suelo. Acorde con la literatura revisada, las EO tienen el potencial de mejorar el perfil nutricional de algunos de cultivos al mismo tiempo que contribuyen a la salud del suelo. Existe la oportunidad de ampliar la investigación sobre el impacto diferenciado en variedades del mismo cultivo, ya que en los estudios en los que si se tomó en cuenta este factor se demostró que hay variedades que por

su naturaleza tienden a acumular más fitoquímicos que otras.

También en realizar la medición en distintos tiempos de cosecha, y si el aumento de la cantidad de fitoquímicos tiene un impacto positivo en la dieta y salud humana, ya que se desconocen los mecanismos específicos de biodisponibilidad de estos nutrientes.

Otra oportunidad importante, es la caracterización del microbioma del suelo. Uno de los mecanismos reconocidos mediante los cuales las EO mejoran la salud del suelo es por mejorar las condiciones para los microorganismos, además de aportarlos. Es importante cuantificar las proporciones en las que diferentes perfiles de microorganismos benefician la producción de fitoquímicos en la planta. Considerando una de las fronteras de la biodiversidad a menudo olvidada, la de los suelos.

El uso de enmiendas orgánicas (EO) optimiza recursos finitos al aportar macro y micronutrientes, así como compuestos de carbono que mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo. Sin embargo, algunas EO como el estiércol y los biosólidos pueden contener elementos potencialmente dañinos para el medio ambiente y la salud humana. Por ello, es crucial investigar los riesgos asociados, como la acumulación de contaminantes y desequilibrios en el microbioma del suelo, para garantizar un uso seguro y sostenible de estas prácticas agronómicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por CONAHCYT a través de la beca de estancia doctoral de Jeniffer Giovanna Estrada Pérez (Convocatoria: 2023 (2)).

Referencias

1. Tariq H, Asif S, Andleeb A, Hano C, Abbasi BH. Flavonoid Production: Current Trends in Plant Metabolic Engineering and De Novo Microbial Production. *Metabolites*. 2023 Jan 13;13(1):124.
2. Zillich OV, Schweiggert-Weisz U, Eisner P, Kerscher M. Polyphenols as active ingredients for cosmetic products. *Int J Cosmet Sci*. 2015 Oct;37(5):455–64.
3. Goss MJ, Tubeileh A, Goorahoo D. A Review of the Use of Organic Amendments and the Risk to Human Health. In: *Advances in Agronomy* [Internet]. Elsevier; 2013 [cited 2024 Sep 30]. p. 275–379. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124076860000051>
4. Secretaría de Economía. NORMA MEXICANA NMX-AA-180-SCFI-2018 QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL TRATAMIENTO AEROBIO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y DE MANEJO ESPECIAL, ASÍ COMO LA INFORMACIÓN COMERCIAL Y DE SUS PARÁMETROS DE CALIDAD DE LOS PRODUCTOS FINALES. 2018.
5. Montgomery DR, Biklé A, Archuleta R, Brown P, Jordan J. Soil health and nutrient density: preliminary comparison of regenerative and conventional farming. *PeerJ*. 2022 Jan 27;10:e12848.
6. Centro Universitario del Sur, Universidad de Guadalajara, Macías Macías A, Sevilla García YL, Centro Universitario del Sur, Universidad de Guadalajara. Naturaleza vulnerada. Cuatro décadas de agricultura industrializada de frutas y

hortalizas en el sur de Jalisco, México (1980–2020). ED. 2021 Jan 30;8(1):64–91.

7. Biondi F, Balducci F, Capocasa F, Visciglio M, Mei E, Vagnoni M, Mezzetti B, Mazzoni L. Environmental Conditions and Agronomical Factors Influencing the Levels of Phytochemicals in Brassica Vegetables Responsible for Nutritional and Sensorial Properties. *Applied Sciences*. 2021 Feb 22;11(4):1927.

8. Castronuovo D, De Feo V, De Martino L, Cardone L, Sica R, Caputo L, Amato G, Candido V. Yield Response and Antioxidant Activity of Greenhouse Organic Pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) as Affected by Soil Solarization and Biofumigation. *Horticulturae*. 2023 Mar 25;9(4):427.

9. Andrade-Sifuentes A, Fortis-Hernández M, Preciado-Rangel P, Orozco-Vidal JA, Yescas-Coronado P, Rueda-Puente EO. *Azospirillum brasilense* and Solarized Manure on the Production and Phytochemical Quality of Tomato Fruits (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomy*. 2020 Dec 12;10(12):1956.

10. Pereira MMA, Moraes LC, Mogollón MCT, Borja CJF, Duarte M, Buttrós VHT, Luz JMQ, Pasqual M, Dória J. Cultivating Biodiversity to Harvest Sustainability: Vermicomposting and Inoculation of Microorganisms for Soil Preservation and Resilience. *Agronomy*. 2022 Dec 28;13(1):103.

11. Catani MV, Rinaldi F, Tullio V, Gasperi V, Savini I. Comparative Analysis of Phenolic Composition of Six Commercially Available Chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) Extracts: Potential Biological Implications. *IJMS*. 2021 Sep 30;22(19):10601.

12. Kannika MK, Yogeshwari D, Lakshmi DKN. Effect of vermicompost on

soil fertility and the nutritional status of *Andrographis paniculata* and *Euphorbia hirta*.

13. Rizvi A, Ahmed B, Khan MS, El-Beltagi HS, Umar S, Lee J. Bioprospecting Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Enhancing the Biological Properties and Phytochemical Composition of Medicinally Important Crops. *Molecules*. 2022 Feb 19;27(4):1407.

14. Antonious G. The Impact of Organic, Inorganic Fertilizers, and Biochar on Phytochemicals Content of Three Brassicaceae Vegetables. *Applied Sciences*. 2023 Jul 30;13(15):8801.

15. Siddiqui Y, Munusamy U, Naidu Y, Ahmad K. Integrated Effect of Plant Growth-Promoting Compost and NPK Fertilizer on Nutrient Uptake, Phenolic Content, and Antioxidant Properties of *Orthosiphon stamineus* and *Cosmos caudatus*. *Hortic Environ Biotechnol*. 2020 Dec;61(6):1051–62.

16. Yaldiz G, Arici YK, Yilmaz G. Phytochemical Analysis, Antioxidant and Antibacterial Activities of Four Lamiaceae Species Cultivated in Barnyard Manure. *Phytochemical Analysis*. 2017;

17. Ceccanti C, Landi M, Antichi D, Guidi L, Manfrini L, Monti M, Tosti G, Frascioni C. Bioactive Properties of Fruits and Leafy Vegetables Managed with Integrated, Organic, and Organic No-Tillage Practices in the Mediterranean Area: A Two-Year Rotation Experiment. *Agronomy*. 2020 Jun 12;10(6):841.

18. Stefanson AL, Tsao R, Liu R, Duizer L, Bakovic M, Martin RC. Effect of variety, soil fertility status and agronomic treatments on carrot mineral and phytochemical composition and consumer liking of flavor traits. *J Sci Food Agric*. 2019 Sep;99(12):5457–74.

19. Anjos R, Cosme F, Gonçalves A, Nunes FM, Vilela A, Pinto T. Effect of agricultural practices, conventional vs organic, on the phytochemical composition of 'Kweli' and 'Tulameen' raspberries (*Rubus idaeus* L.). *Food Chemistry*. 2020 Oct;328:126833.
20. Mehdiniyaafra J, Niknejad Y, Fallah Amoli H, Barari Tari D. Effects of drought stress on some phytochemical characteristics of rice cultivars under different chemical and organic nutritional sources. *Journal of Plant Nutrition*. 2021 May 9;44(8):1193–206.
21. Mohammadi E, Fattahi M, Barin M, Ashrafi-Saeidlou S. Arbuscular mycorrhiza and vermicompost alleviate drought stress and enhance yield, total flavonoid concentration, rutin content, and antioxidant activity of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *South African Journal of Botany*. 2022 Aug;148:588–600.
22. Frias-Moreno MN, Olivas-Orozco GI, Gonzalez-Aguilar GA, Benitez-Enriquez YE, Paredes-Alonso A, Jacobo-Cuellar JL, Salas-Salazar NA, Ojeda-Barrios DL, Parra-Quezada RA. Yield, Quality and Phytochemicals of Organic and Conventional Raspberry Cultivated in Chihuahua, Mexico. *Not Bot Horti Agrobo*. 2018 Dec 21;47(2):522–30.
23. Othman YA, Leskovar D. Organic soil amendments influence soil health, yield, and phytochemicals of globe artichoke heads. *Biological Agriculture & Horticulture*. 2018 Apr 16;1–10.
24. Montoya D, Fernández JA, Franco JA, del Carmen Martínez Ballesta M. Enriched-biochar application increases broccoli nutritional and phytochemical content without detrimental effect on yield. *J Sci Food Agric*. 2022 Dec;102(15):7353–62.
25. Roussos PA, Karabi A, Anastasiou L, Assimakopoulou A, Gasparatos D. Apricot Tree Nutrient Uptake, Fruit Quality and Phytochemical Attributes, and Soil Fertility under Organic and Integrated Management. *Applied Sciences*. 2023 Feb 17;13(4):2596.
26. Phares CA, Atiah K, Frimpong KA, Danquah A, Asare AT, Aggor-Woanenu S. Application of biochar and inorganic phosphorus fertilizer influenced rhizosphere soil characteristics, nodule formation and phytoconstituents of cowpea grown on tropical soil. *Heliyon*. 2020 Oct;6(10):e05255.
27. Roussos PA, Triantafyllidis A, Kepolas E, Peppas P, Piou A, Zoti M, Gasparatos D. Effects of Integrated and Organic Management on Strawberry (cv. Camarosa) Plant Growth, Nutrition, Fruit Yield, Quality, Nutraceutical Characteristics, and Soil Fertility Status. *Horticulturae*. 2022 Feb 21;8(2):184.
28. Mukhtar A, Manzoor M, Gul I, Zafar R, Jamil HI, Niazi AK, Ali MA, Park TJ, Arshad M. Phytotoxicity of different antibiotics to rice and stress alleviation upon application of organic amendments. *Chemosphere*. 2020 Nov;258:127353.
29. Machado RMA, Alves-Pereira I, Lourenço D, Ferreira RMA. Effect of organic compost and inorganic nitrogen fertigation on spinach growth, phytochemical accumulation and antioxidant activity. *Heliyon*. 2020 Sep;6(9):e05085.
30. Libutti A, Russo D, Lela L, Ponticelli M, Milella L, Rivelli AR. Enhancement of Yield, Phytochemical Content and Biological Activity of a Leafy Vegetable (*Beta vulgaris* L. var. *cycla*) by Using Organic Amendments as an Alternative to Chemical Fertilizer. *Plants*. 2023 Jan 27;12(3):569.

Diseño de una máquina para pruebas biaxiales en tejido blando

Design of a biaxial soft tissue testing machine

¹Gómez Martínez Jesús Ariel, ¹Torres San Miguel Christopher René.

¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Zacatenco, 07738, CDMX.
Ciudad de México, México
ctorress@ipn.mx

Palabras clave: Pruebas biaxiales, tejido biológico, elementos finitos, estado plano de esfuerzos, SolidWorks.

Resumen- Este artículo presenta el diseño de un dispositivo biaxial para ensayos de tensión en tejidos biológicos. El objetivo principal es ofrecer una alternativa a los equipos comerciales existentes, permitiendo realizar pruebas biaxiales fiables aplicando fuerzas en dos direcciones perpendiculares a una muestra de tejido. El diseño del dispositivo se realizó en modelado CAD en el software de SolidWorks®, donde se optimizaron los sistemas de sujeción basados en anzuelos y el sistema de transmisión de fuerzas. Además, se realizaron simulaciones de elementos finitos (FEA) para validar la capacidad estructural del equipo bajo carga simulando su operación en condiciones reales.

Keywords: Biaxial testing, finite element, biological tissue, plane stress state, SolidWorks.

Abstract- This article presents the design of a biaxial device for tensile tests in biological tissues. The article's aim is to provide a versatile alternative to existing commercial equipment, allowing reliable biaxial testing by applying forces in two directions perpendicular to a tissue sample. The device was designed in CAD modelling in SolidWorks® software, where hook-based clamping systems and force transmission system were optimized. In addition, finite element simulations (FEA) were performed to validate the structural capability of the equipment under load by simulating its operation under real conditions.

1. Introducción

Un ensayo biaxial es una prueba utilizada para determinar las constantes elásticas de un material, sometiéndolo a fuerzas en dos direcciones perpendiculares y analizando las respuestas en cuanto a linealidad y desviaciones, proporcionando información sobre los comportamientos anisotrópicos u ortotrópicos [1]. El equipo necesario para realizar estas pruebas debe garantizar la capacidad de aplicar fuerzas controladas en

múltiples direcciones, además de una correcta sujeción al material de prueba de manera distribuida, logrando un estado uniforme de esfuerzos en el centro de la muestra [2]. Cuando los componentes del esfuerzo sobre planos normales al eje z , z ; zx y zy , son nulos, están siempre contenidas en el plano xy , y entonces se dice que se tiene un estado plano de esfuerzos. El estado plano de esfuerzos queda completamente definido por los componentes x ; y ; xy [3].

Actualmente en el mercado se cuenta con múltiples equipos capaces de realizar pruebas biaxiales, estos equipos suelen ser altamente sofisticados y están diseñados para una gran variedad de aplicaciones, como la caracterización de materiales compuestos, polímeros, metales y tejidos biológicos, ofreciendo entornos controlados y software avanzado para la adquisición de datos, sin embargo la principal desventaja de estos equipos comerciales es su precio elevado, que puede limitar su accesibilidad para laboratorios o centros de investigación con presupuestos restringidos [4]. El costo también incluye el software especializado, mantenimiento, y accesorios como sensores o sistemas de sujeción adicionales.

Por su parte Mingland et al [5] muestran el diseño una maquina de ensayos automatizada capaz de realizar ensayos uniaxiales, biaxiales y de cizallamiento, además de proponer un protocolo de prueba. Andrea et al [6] proponen el diseño de un sistema de pruebas (BiMaTS) apto para un amplio rango de dimensiones de muestra, utilizando componentes existentes en el mercado logrando una fácil fabricación manteniendo un bajo costo.

Este trabajo tiene como objetivo el diseño de un dispositivo de ensayos biaxiales para realizar pruebas a tensión en tejido biológico, que cumpla con las características de ser compacto, económico y versátil.

2. Metodología

El diseño propuesto para el dispositivo biaxial se basa en el sistema utilizado para muestras planas en forma de cruceta y muestras cuadradas sujetadas a través de un BioRake [7]. El archivo CAD se diseñó en el software de SolidWorks Premium 2022, el programa fue elegido por su robustez en el modelado a computadora, que permite crear geometrías complejas y personalizarlas con precisión a las

especificaciones necesarias para el dispositivo de ensayos biaxiales. Además, ofrece herramientas para la simulación dinámica y estática, facilitando la validación del diseño antes de la fabricación, lo cual ayuda a asegurar que el equipo pueda soportar las fuerzas biaxiales previstas sin comprometer su integridad o funcionamiento [8].

El proceso del diseño comienza con el modelado de cada componente individual, replicando las piezas existentes en el mercado y añadiendo las que deben fabricarse para su ensamblaje. SolidWorks permite realizar análisis de elementos finitos (FEA) sobre el modelo CAD. Este complemento fue utilizado para simular las cargas y esfuerzos que experimentarán las piezas del dispositivo, como los sistemas de sujeción de la muestra y los puntos de unión de los motores. El análisis estructural identificó posibles zonas de fallo, optimizando el diseño reduciendo concentraciones de esfuerzo y reforzando las áreas más sensibles.

El sistema de transmisión de fuerza del dispositivo (figura 1) consta de 4 servomotores Nema 23 bifásicos, capaces de soportar una carga horizontal de 30 kg, y con una velocidad máxima de 50mm/s, cada uno acoplado a una cama de tuerca deslizante M4 horizontal con un recorrido efectivo de 150 mm, donde se fijará el sistema de sujeción para la muestra y una celda de carga DYMh-103, con un rango de capacidad de 0-50 kg, con una sensibilidad de 1.0-1.5 mV/V y una frecuencia de respuesta de 10 kHz.

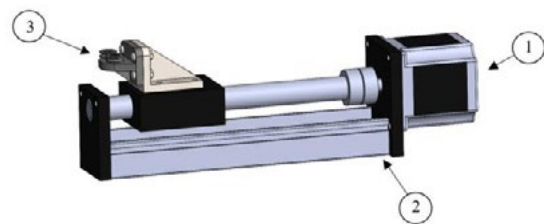


Fig. 1 Diseño del Sistema de transmisión de fuerza: (1) motor Nema 17, (2) cama deslizante, (3) sistema de sujeción.

El sistema de control para el dispositivo (figura 2) consta de una placa Arduino mega 2560, además de controladores TB6600 y amplificadores de señal HX711 a 24bits de doble canal conectados a cada motor con el propósito de poder manipular de forma independiente cada eje.

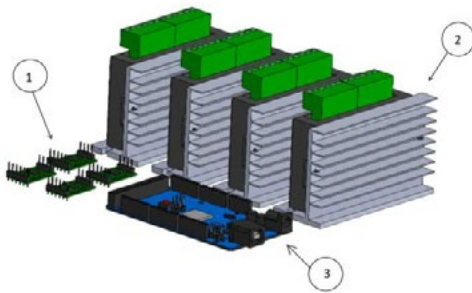


Fig. 2 Representación CAD del sistema de control: (1) amplificador HX711, (2) controlador TB6600, (3) Arduino Mega 2560.

El diseño del sistema de sujeción (figura 3) fue basado las mordazas utilizadas en los equipos comerciales, debido al tipo de material para el que está destinado este dispositivo se optó por una sujeción mediante rastrillos tipo anzuelos fijados a cada lado de la muestra, los cuales estarán atados a un hilo de acero inoxidable recubierto de nilón, conectados entre si pasando por dos poleas de aluminio M4. El diseño de la base permite que la pieza sea impresa en 3D facilitando su remplazo e instalación. Los anzuelos Las mordazas tradicionales pueden generar puntos de presión que dañan los tejidos delicados, mientras que los rastrillos distribuyen mejor las fuerzas aplicadas, minimizando el riesgo de roturas o deformaciones indeseadas.

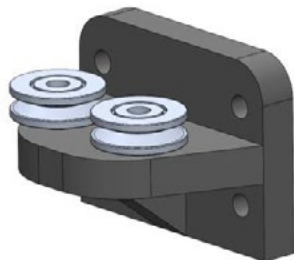


Fig. 3 Diseño del soporte de los rastrillos.

Los componentes (figura 4) se montarán sobre dos placas de acrílico perforadas, colocando cada sistema de motor encontrado entre si en forma de cruz, la distancia entre cada uno puede variar según los requerimientos de la prueba, ampliando o disminuyendo el área destinada de operación.

La muestra deberá anclarse a los anzuelos previamente instalados en el sistema de sujeción. Los motores estarán controlados por la unidad HX711 los cuales a través de la interfaz de Arduino se les dará las instrucciones destinadas para el ensayo, considerando el desplazamiento y tiempo de ejecución. Este modelo de motor permite realizar ensayos cíclicos acoplándose a las necesidades del usuario.

Durante el ensayo, los motores accionaran las camas deslizantes, el desplazamiento será obtenido por el sistema de control de los motores de cada eje partiendo de un punto inicial, se podrá obtener la deformación sufrida por la muestra. Las celdas de carga brindarán los datos relacionados a la fuerza ejercida en cada eje, teniendo así dos gráficas: carga-tiempo y desplazamiento-tiempo, una asignada al eje en X y otra al eje Y.

Para unificar estas gráficas se recurrirá al método de interpolación de Lagrange, el cual es un método utilizado para aproximar una función desconocida a partir de un conjunto de puntos conocidos. Es un método de interpolación polinómica donde se busca hallar un polinomio que pase justamente por los puntos dados [9]. Este método de interpolación utiliza un polinomio llamado polinomio de Lagrange, que se construye de la siguiente manera:

$$f_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_1) \quad [10]$$

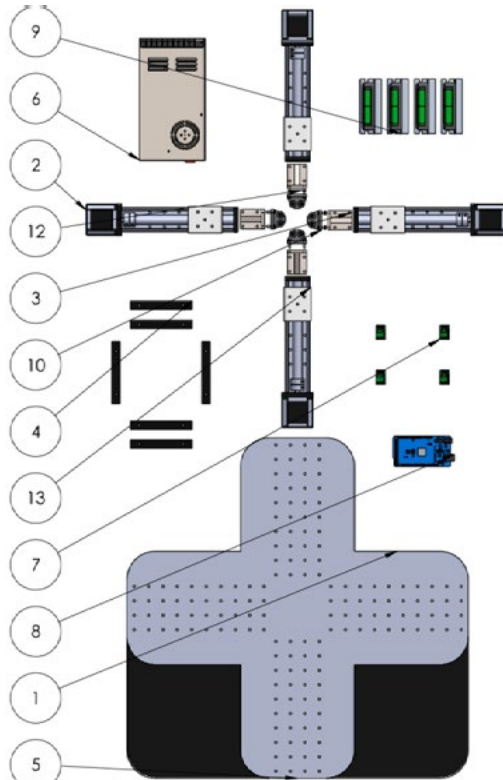


Fig. 4 Vista explosionada del ensamblaje

N.º	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Placa base A	1
2	Motor pasos NEMA	4
3	Soporte de clamp	4
4	Separador para placa	6
5	Placa base B	1
6	Fuente de alimentación	1
7	Hx711	4
8	Arduinomega_STEP_AP 203	1
9	Tb6600	4
10	Clamp rake	4
11	B18.6.7M - M3 x 0.5 x 13 Type I Cross Recessed PHMS	16
12	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M3 x 0.5 --D-C	8

Tabla. 1 listado de partes del dispositivo biaxial

2.1 Diseño conceptual

El ensamblaje realizado en SolidWorks muestra la distribución de los componentes montados en las placas de acrílico. La figura 5(A) muestra un esquema superior de la distribución de los componentes, mientras que la figura 5(B) presenta una vista real del ensamblaje completo.

El diseño ofrece una distribución simétrica de los motores, permitiendo aplicar fuerzas en direcciones perpendiculares a la muestra de tejido. Las placas de acrílico perforadas permitirán que la configuración de los componentes pueda modificarse según los requerimientos de cada prueba, teniendo una longitud mínima destinada para la muestra de 10mm y máxima de 120mm.

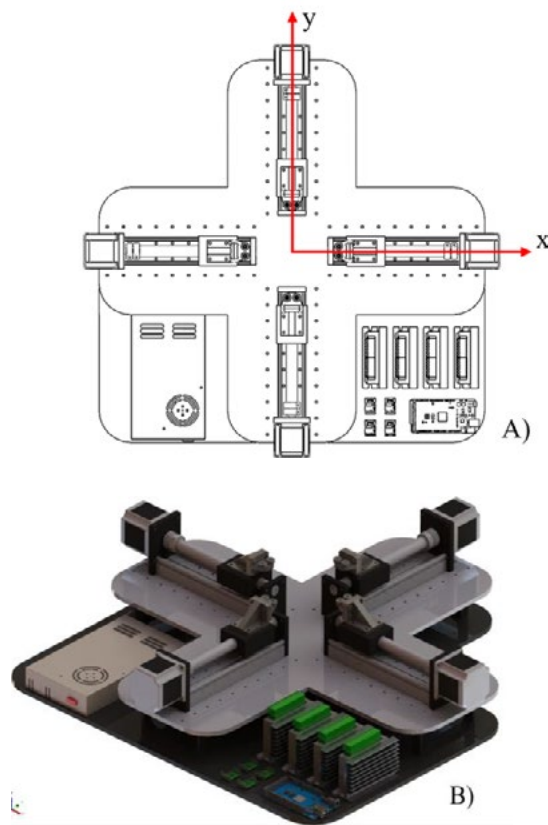


Fig. 5 A) Distribución de los componentes.
B) Real View.

2.2 Condiciones de frontera

En el diseño de la máquina se han definido dos tipos principales de condiciones de frontera:

- Condiciones de Fijación

Para la simulación estática realizada en SolidWorks, el sistema de sujeción fue fijado en los puntos céntricos de las poleas que sujetan los anzuelos, esto en cada sistema de motor restringiendo el movimiento solo a su propio eje horizontal. Estas mordazas se fijaron bajo la suposición de que no experimentan ningún tipo de rotación.

- Aplicación de Fuerzas

Se aplicaron fuerzas de 30 kg en cada eje (294.3 N) considerando la fuerza máxima ejercida por cada motor. Las fuerzas fueron aplicadas en la cama deslizante a lo largo del eje de movimiento del sistema de transmisión de fuerza.

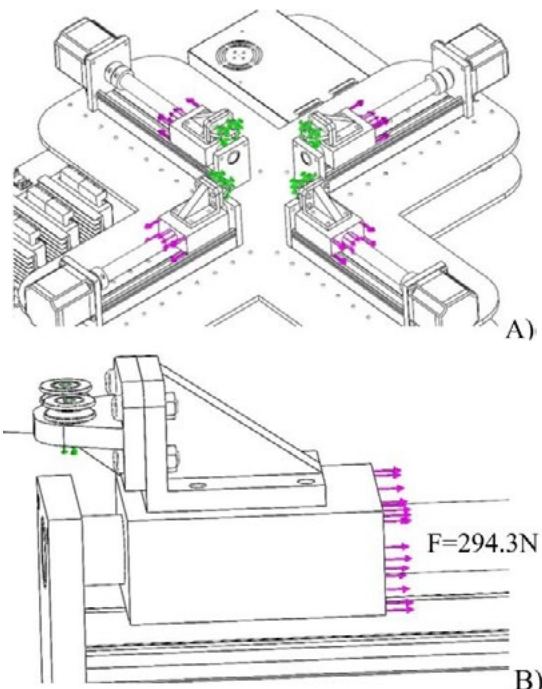
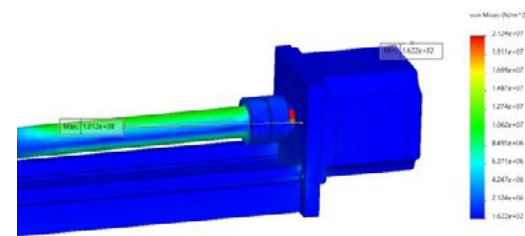
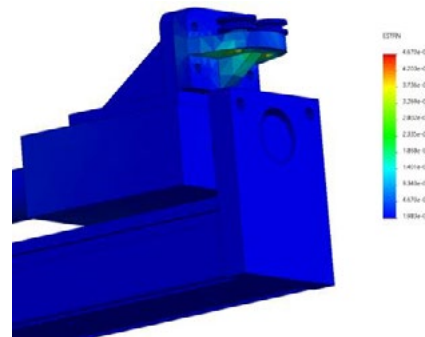


Fig. 6 A) Representación de condiciones de frontera. B) vista detallada sistema de sujeción

Estas condiciones fueron seleccionadas para lograr replicar las cargas y restricciones a las que se someterá el dispositivo durante su operación. Las fijaciones aplicadas aseguran que las mordazas permanecen estables y sujetas, mientras que las fuerzas simulan el esfuerzo máximo que puede ejercer sobre el tejido cada motor. El análisis estático proporciona información sobre la deformación, esfuerzos mínimos y máximos en el ensamblaje para verificar que el diseño sea estructuralmente adecuado para soportar las cargas durante el proceso de las pruebas.

4. Resultados



El análisis estático del ensamblaje muestra que los esfuerzos se distribuyen correctamente en las piezas sometidas a la fuerza aplicada (figura 7 y 8). Como se observa en los campos de esfuerzos, el esfuerzo máximo alcanza un valor de $1.012 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ (101.2 MPa) en las áreas

cercanas al eje que conecta al motor con las camas deslizantes, estos esfuerzos están por debajo del límite elástico del material seleccionado, lo que garantiza que el diseño es estructuralmente seguro para soportar las fuerzas aplicadas durante las pruebas.

5. CONCLUSION

La máquina de ensayos biaxiales desarrollada en este trabajo brinda una opción accesible y eficiente para la caracterización de tejidos biológicos. Los resultados obtenidos durante la simulación estática indican que, durante su operación bajo condiciones de carga, no se observan zonas críticas de falla en la estructura. La deformación resultante de la máquina se encuentra dentro de los límites aceptables, lo que garantiza su correcto funcionamiento sin comprometer la integridad estructural del dispositivo por lo que es capaz de soportar las fuerzas requeridas, así como de ofrecer una sujeción adecuada del tejido biológico sin daños en la muestra.

Referencias

[1] Ren, M., Chen, Y., & Liu, P. (2022). Investigating the Mechanical Properties of Soft Tissues Using a Novel Biaxial Testing System. *Materials Today: Proceedings*, 65(3), 100-108. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067222000785>.

[1] Sun, N., Lan, H., & Sacks, M. S. (2018). Biaxial Mechanical Evaluation of the Anisotropic Properties of Heart Valve Tissues: A Comparison of Native and Engineered Tissues. *Journal of Biomechanics*, 79, 206-215. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021929018308509>.

[2] Welsh, J.S.; Adams, D.F. An experimental investigation of the biaxial strength of IM6/3501-6 carbon/epoxy cross-ply laminates using cruciform specimens. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2002, 33, 829–839.

[3] Cervera, M., & Blanco, E. (2015). *Resistencia de Materiales* (pp. 6-28).

[4] Development of a Biaxial Testing System for Soft Tissue Characterization. *Materials Today: Proceedings*, 18, 354-362. Recuperado de <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85076770933&origin=inward&txGid=766bd040965a6680a9d4f37bf520fcd1>.

[5] Schroeder, M. J., & Brach, R. M. (2016). Mechanical Characterization of Soft Tissues Using Indentation Methods. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 61, 243-256..

[6] Ren, M., Chen, Y., & Liu, P. (2022). Investigating the Mechanical Properties of Soft Tissues Using a Novel Biaxial Testing System. *Materials Today: Proceedings*, 65(3), 100-108. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067222000785>.

[7] CellScale. (s.f.). BioTester: Biaxial Testing for Soft Tissues. Recuperado de <https://www.cellscale.com/products-cellscale-biomaterials-testing/biotester/>.

[8] SolidWorks. (s.f.). Software de diseño y simulación 3D. Recuperado de <https://www.solidworks.com/es>.

[9] García, S. (2023). Análisis de propiedades mecánicas utilizando R. *RPubs*. Recuperado de <https://rpubs.com/stanisla053/1060172>.

[10] Díaz, J. (s.f.). *Tema 5: Solución de sistemas de ecuaciones lineales*. Universidad de Valencia. Recuperado de https://www.uv.es/diazj/cn_tema5.pdf.

Mezcla asfáltica reducida en asfalto adicionada con polietileno de baja densidad por el método seco

Asphalt mix reduced in asphalt added with low density polyethylene by the dry method

Estrada Anaya, Emmanuel
Jefatura de Análisis y Sistemas
Centro de Capacitación del Personal Operativo del Transporte del Estado de Querétaro
Querétaro, México
eestradanaya@gmail.com

López Lara, Teresa
Profesor investigador
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México
lolte@uaq.mx

Horta Rangel, Jaime
Profesor investigador
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México

Hernández Zaragoza, Juan Bosco
Profesor investigador
Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México

Vilchis Hernández, Danae Alejandra
Investigadora
Instituto Mexicano del transporte
Querétaro, México

Palabras clave: VTM, Mezcla asfáltica, Residuos plásticos, Estabilidad, Flujo.

Resumen- El transporte y la construcción son responsables de una parte importante de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial [10]. Las emisiones del transporte han aumentado debido al crecimiento de usuarios [7], sumándose la contaminación del aire con la producción de asfalto y la remoción de vegetación [2], [1].

Este estudio es la primera etapa de una tesis de investigación sobre la adición de residuos plásticos en mezclas asfálticas en las que se reduce el contenido óptimo de asfalto de una mezcla de control en un 10%

Se evaluó una mezcla asfáltica de control, diseñada por método Marshall, que incluye residuos de LDPE reciclado en proporciones del 6 al 12% respecto al peso del agregado pétreo en forma de pellets de 6 mm, usando el método seco. Se determinó la estabilidad y el flujo mediante ensayo Marshall. Los resultados indican que la mezcla con un 10% de LDPE presenta una estabilidad hasta 2.4 veces superior a la de control, junto con un incremento de 2 mm en el flujo. Esto sugiere que la incorporación de plásticos reciclados es una opción viable para su uso en carpetas asfálticas.

Keywords: VTM, Stability, flow, asphalt mix, plastic waste, partial substitution.

Abstract-

Transportation and construction are responsible for a important portion of global greenhouse gas (GHG) emissions [10]. Emissions from transportation have increased due to the growth of users [7], adding noise and air pollution with asphalt production and vegetation removal [2], [1].

This study is the first stage of a research thesis on the addition of plastic waste in asphalt mixtures in which the optimum asphalt content of a control mixture is reduced by 10%, which seeks to develop sustainable materials that mitigate the impact of pollution.

A control asphalt mix, designed by Marshall method, including recycled LDPE waste in proportions of 6 to 12% of the weight of the stone aggregate in the form of 6 mm pellets, was evaluated using the dry method. Stability and flow were determined by Marshall test. The results indicate that the 10% LDPE mix has up to 2.4 times the stability of the control mix, along with a 2 mm increase in flow. This suggests that the incorporation of recycled plastics is a viable option for use in asphalt pavements.

1. Introducción

Una infraestructura vial en buenas condiciones es fundamental para impulsar el desarrollo económico de un país. Para lograr incrementar la calidad de esta infraestructura, es necesario establecer objetivos claros en el sector transporte que permitan desarrollar una estrategia integral. Esta estrategia debe enfocarse en mejorar las condiciones de las vías y optimizar los recursos destinados a su mantenimiento. En este sentido, los principales objetivos para la mejora de las vías carreteras son incrementar la seguridad y el confort a la vez que se disminuyan los costos de conservación para garantizar una infraestructura duradera. Según Naghawi et al. [6], gran parte de estos objetivos se pueden alcanzar mediante un diseño estructural adecuado del pavimento y una correcta formulación de la mezcla asfáltica. A lo largo del tiempo, numerosos estudios han buscado perfeccionar y mejorar los parámetros de diseño de en estas mezclas, un avance clave es la incorporación de diversos agentes modificadores, entre los más utilizados se encuentran el filler, fibras, oxidantes, antioxidantes, hule molido y polímeros.

Los polímeros que se utilizan en mezclas asfálticas pueden provenir de plástico desechado, lo que ofrece una solución viable para uno de los más grandes retos ambientales de la actualidad: la gestión de residuos plásticos. Según White y Magee [5], los residuos plásticos, como plásticos industriales, bolsas y botellas, representan un desafío ambiental creciente. Como resultado, ha aumentado el interés en reciclar estos residuos, incluso en su aplicación en materiales de construcción. Se busca utilizar estos residuos como un modificador de bajo costo en las mezclas asfálticas.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [15] informó que cada minuto se adquieren cerca de 1 millón de botellas de material plástico desechables y que cada año se consumen aproximadamente cinco billones de bolsas de plástico que solamente tienen un uso., según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [9] En la capital de México se producen 123 toneladas de residuos plásticos al día, con una gestión inadecuada. Noor y Rehman [3] subrayan la creciente importancia de la conservación de energía a nivel global, lo que propician la investigación de nuevas alternativas que aminoren el uso de combustibles no renovables.

Frente a esta problemática, varios estudios han explorado la utilización de residuos plásticos reciclados añadidos a mezclas asfálticas, por ejemplo Vasudevan et al. [15] concluyen que es posible utilizar porcentajes altos de residuos plásticos en mezclas asfálticas a la vez que se puede reducir el uso del cemento asfáltico hasta en un 10% y así mejorar el comportamiento de los caminos en donde se empleen, sin embargo la adición de residuos plásticos requiere energía térmica adicional, lo que incrementa el gasto energético y el impacto ambiental, bajo esta consideración Noor y Rehman [3] proponen un método de incorporación en seco, precalentando los agregados a 170°C antes de añadir el modificador y luego el asfalto.

Como solución a este desafío, se planteó la incorporación de plásticos de residuo de LDPE procesados en formato de pellets, lo que facilitaría su integración en las mezclas asfálticas sin necesidad de realizar modificaciones al proceso ni incrementar el consumo de energía. Este método, evaluado mediante el procedimiento Marshall, busca aminorar el daño ambiental a la vez que optimiza el comportamiento de una mezcla asfáltica.

Este artículo busca mejorar la estabilidad y parámetro de flujo de una mezcla bituminosa por medio de la incorporación de residuos plásticos reciclados de LDPE, utilizando el método seco sin necesidad de realizar alteraciones significativas en el proceso de mezclado, evitando así la adición de energía y calor. Por último, la mezcla obtenida se comparó en términos de resistencia y deformación con una mezcla de control sin residuos plásticos.

2. Metodología

a) Materiales y Equipos

El procedimiento de este trabajo de investigación consistió en el muestreo de

ligante asfáltico, material de agregado pétreo y residuos plásticos con el propósito de generar un diseño de mezcla asfáltica de referencia utilizando como método el procedimiento Marshall. Esto permitió evaluar las propiedades alcanzadas, comparándolas con las características de las mezclas incorporadas con residuos plásticos. Se compactaron tres especímenes de cada porcentaje de asfalto en mezcla, mediante el procedimiento estandarizado para la elaboración de especímenes, utilizando el método Marshall [11] para después ser ensayados por el método [12]

Cuando se obtienen los resultados del diseño Marshall de referencia, se continúa con la elaboración de especímenes con residuos plásticos en los cuales se selecciona como contenido óptimo de cemento asfáltico el valor de la mezcla de referencia reducido en un 10%. Para la mezcla de contenido plástico, se añadieron residuos en porcentajes de 6%, 8%, 10% y 12% respecto al peso del pétreo, sin realizar modificaciones en la curva granulométrica del diseño de referencia. Se utilizaron las temperaturas especificadas por la curva de viscosidad-temperatura del asfalto, evitando precalentar el agregado a temperaturas más altas, lo que ayuda a disminuir el gasto de energía. A continuación, se describe el procedimiento y los materiales empleados durante la investigación:

b) Obtención y Caracterización de Materiales

Los materiales pétreos fueron muestreados en un banco de acuerdo con el procedimiento que indica la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [14] para el muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas. Fueron adquiridos por donación del banco Agregados CEMEX Querétaro, ubicado en Huimilpan, Qro., México (coordenadas: Latitud 20.497898°, Longitud -100.318745°). Se obtuvieron muestras de agregado de

tamaños nominales de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ " y arena, con el objetivo de lograr la combinación óptima que presente el ajuste granulométrico deseado. Para caracterizar los materiales pétreos se realizaron ensayos siguiendo la normativa establecida por ASTM, AASHTO y SICT.

El material asfáltico seleccionado para la mezcla se trata de un asfalto PG 64-22, donación de la empresa Mega Asfaltos S.A. de C.V. ubicada en Salamanca, Guanajuato, México, en una muestra aproximada de 20 litros. Para determinar las temperaturas en las que es óptimo el procedimiento de mezclado y de compactación, se utilizó el método de ensaye estandarizado para la determinación del valor de viscosidad del asfalto a diferentes temperaturas, utilizando un viscosímetro rotacional [13]. Este instrumento evalúa la viscosidad rotacional por medio del torque que se requiere para mantener una velocidad rotacional constante en un eje cilíndrico sumergido dentro de una muestra bajo temperatura controlada.

Los plásticos reciclados fueron adquiridos mediante la planta recicladora Salcan Plastic S.A. de C.V., la cual se localiza en Monterrey, Nuevo León, México. El producto reciclado en cuestión es LDPE en forma de pellets con un diámetro promedio de 6 mm, (Fig.1). Se realizó una clasificación mediante mediciones con vernier y el paso del material por diversas mallas, determinando así el número de malla donde se retiene el material.



Fig.1. Pellets de LDPE.

Fuente: Elaboración propia.

c) Métodos Experimentales de Diseño Base y Modificado

Para la elaboración del diseño de referencia y las pastillas con plástico añadido, se utilizó la misma metodología de diseño Marshall, conforme al procedimiento estándar para la preparación de especímenes bituminosos [11], aunque con algunas diferencias. Se comenzó por precalentar los materiales en un horno con el valor de temperatura límite superior de mezclado, determinada mediante la prueba de viscosímetro rotacional de Brookfield, en un periodo de dos horas para asegurar la homogeneidad de temperatura en el agregado pétreo y el asfalto. Posteriormente, se añadió el asfalto, calentado dentro del rango adecuado, al agregado pétreo, mezclando para asegurar la incorporación del asfalto. En el caso de los especímenes con residuos plásticos añadidos, estos se agregaron directamente durante el mezclado, respetando la temperatura de mezclado indicada en el ensayo de viscosidad. Se garantizó que no quedaran partículas descubiertas.

Según Adou et al. [4], para incorporar residuos plásticos por el método seco se debe mezclar a temperaturas entre 160 °C y 170 °C para evitar la degradación térmica del material. Este proceso es más sencillo y permite un rango más amplio de adición de plástico, incrementando la densidad de los especímenes, ya que los residuos tienden a recubrirse con el agregado. Para este trabajo, se decidió utilizar solo el límite superior de temperatura de mezclado, buscando una mezcla uniforme en un periodo de 10 minutos de mezclado manual.

Una vez mezclados los materiales, se realizó un curado en horno a la temperatura de compactación del asfalto durante 2 horas. Tras este tiempo, la mezcla se retiró del horno y se colocó en el molde Marshall, donde se compactó con 75 golpes con el pisón Marshall en ambos lados del espécimen. Al finalizar la

compactación, se dejaron reposar especímenes hasta que su temperatura bajara lo necesario para ser desmoldados. Un día después, se tomaron las mediciones de peso en aire, en condición saturado superficialmente seco y sumergido en agua, para calcular volúmenes, vacíos en la mezcla, vacíos del agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VFA). La (Tabla.1) resume comparativamente las diferencias entre los procedimientos usados en el diseño de las mezclas. En el diseño base, se utilizaron los resultados de estabilidad y flujo para definir el porcentaje óptimo de asfalto que presentara las mejores condiciones en vacíos. Para los especímenes añadidos con residuos plásticos, se utilizó el contenido de asfalto reducido en un 10% para solo concentrarse en determinar un contenido óptimo de residuos plásticos que mantenga un mejor valor de estabilidad.

Tabla 1. Comparativa entre el diseño del tipo de mezcla.

Paso	Diseño Base	Diseño Modificado
1	Precalentado de materiales pétreos a temperatura de mezclado 2 h.	
2	Precalentado de asfalto a temperatura de mezclado 2 h.	
3	NA	Incorporación de residuos plásticos
4	Mezclado de agregado pétreo con asfalto	
5	Curado de 2 h a temperatura de compactación	Curado de 4 h a temperatura de compactación
6	Compactación a 75 golpes por capa	
7	Medición y Pesos de especímenes	
8	Ensayo en prensa Marshall	
9	Evaluación de resultados.	

3. Resultados y discusión

Se determinaron las propiedades correspondientes a la fracción gruesa y fina en los materiales pétreos mediante ensayos de laboratorio, los cuales se evidencian en la (Tabla.2) Los valores obtenidos cumplen con las especificaciones de cada designación, destacando la elevada densidad relativa del agregado, lo cual indica una buena calidad y resistencia a la abrasión, corroborado por los ensayos de desgaste de los ángeles y microdeval.

Por otro lado, la fracción fina del agregado presentó un valor de azul de metileno en el límite máximo permitido, lo cual puede indicar la presencia de material fino indeseable que afecte la adherencia asfalto-agregado pétreo.

Para el aglutinante asfáltico, se trazó la curva de viscosidad-temperatura a partir de los resultados del viscosímetro rotacional de Brookfield, que se muestra en la (Fig.2) Se determinó que el asfalto tiene una viscosidad adecuada para el mezclado con agregado pétreo a temperaturas entre 156 °C y 161 °C. Asimismo, se identificó la temperatura a la que el ligante presenta viscosidades adecuadas para el proceso de compactación, que varían entre 144 °C y 149 °C.

Tabla 2. Características del agregado pétreo.

Prueba	unidad	Método utilizado	Valor Obtenido	Especificación
Desgaste de los ángeles	%	ASTM C131	8.2	30 máx.
Desgaste Microdeval	%	ASTM D 6928-06	10.05	18 máx.
Partículas planas y alargadas	%	ASTM D4791	1.01	40 máx.
Partículas trituradas	%	ASTMD5821	100	
Desprendimiento por fricción	%	AMAAC RA 08/2010	16	20 máx
Densidad relativa, Gsb		ASTM C 127-07	2.831	2.4 mín
Densidad específica, Gsa		ASTM C 127-07	2.904	NA
Intemperismo acelerado	%	ASTM C88-90	12	15 máx. sulfato de sodio
Intemperismo acelerado	%	ASTM C88-90	15	20 máx sulfato de magnesio
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	77.8	50 mín.
Azul de metileno	mg/g	M-MMP-4-04-014/09	15	15 máx.
Angularidad	%	AASHTO T 304-08	45.42	45 mín.

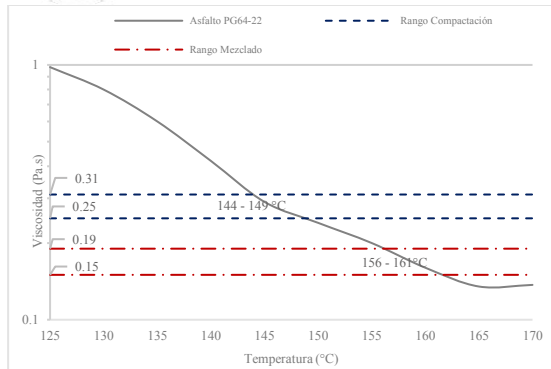


Fig. 2. Curva de Viscosidad-Temperatura Asfalto PG 64-22. Fuente: Elaboración propia.

El diseño Marshall de referencia arrojó un valor de contenido de cemento afáltico óptimo a utilizar de 4.5% en referencia al agregado pétreo, con un peso volumétrico de 2.493 g/cm³, vacíos de 4.26%, VFA de 70.98%, VAM de 14.64%, una estabilidad de 13.17 kN (1343.27 Kg), y flujo de 4.52 mm.

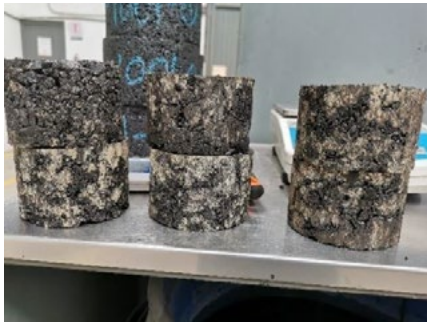


Fig. 3. Pastillas Marshall adicionada con LDPE. Fuente: Elaboración propia.

En los especímenes que fueron modificados con residuos plásticos se utilizó un contenido base de asfalto de 4.05% correspondiente al contenido de la mezcla de referencia reducido en un 10% (figura 3). El análisis se centró en los resultados de estabilidad y flujo utilizando el procedimiento ASTM D6927 [12]. Los especímenes que incorporaron polietileno de baja densidad (LDPE) con morfología de pellets de 6 mm de diámetro, a través del método en seco, mostraron resultados (Tabla 3) en los que la estabilidad se incrementó en todos los casos, alcanzando un valor máximo de 46.59 kN (4,750.86 kg) en un espécimen

con 12% de residuos plásticos en relación con su peso total. Por su parte, los valores de flujo mostraron una tendencia al alza, y a partir de un contenido de LDPE entre el 10% y el 12%, esta tendencia se estabilizó.

La Tabla 3 presenta, en su primera columna, las dosificaciones empleadas, junto con el número del ensayo correspondiente (por ejemplo, 6.1 indica un 6% en el ensayo número 1). La desviación estándar presentada en los valores de estabilidad y flujo se reporta para cada grupo de ensayos, realizados con cuatro tipos de contenido de residuos plásticos: 6%, 8%, 10% y 12%. Se observó que la desviación estándar tiende a aumentar a medida que se incorpora más LDPE a la mezcla, particularmente en los valores de flujo. En cambio, la estabilidad presentó una menor variabilidad en los datos cuando se utilizó un 10% de residuos plásticos.

Tabla 3. Resumen Estabilidad y Flujo en especímenes modificados.

Especímen	Estabilidad (kN)	Promedio (kN)	Desv. Estándar (kN)	Flujo (mm)	Promedio (mm)	Desv. Estándar (mm)
6.1	32.80			6.24		
6.2	28.88	28.35	4.47	4.33	5.49	1.02
6.3	23.89			5.90		
8.1	33.64			6.05		
8.2	31.15	32.39	1.24	6.14	6.10	0.05
8.3	32.37			6.11		
10.1	32.21			6.27		
10.2	32.79	32.72	0.48	7.37	6.87	0.56
10.3	33.16			6.98		
12.1	39.69			7.03		
12.2	35.99	40.76	5.38	7.16	6.92	0.30
12.3	46.59			6.58		

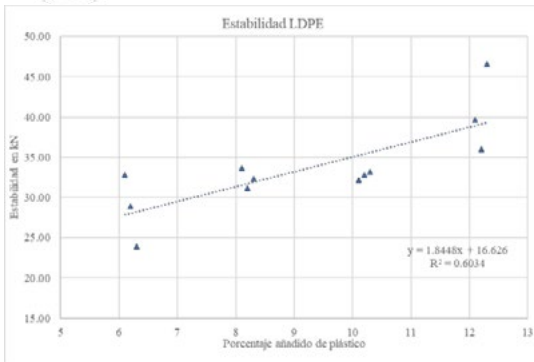


Fig. 4. Estabilidad contra porcentaje de LDPE añadido. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados presentados en la Figura 4 evidencian un aumento en los valores del parámetro de estabilidad proporcional al aumento en el contenido de residuos de LDPE. Se observan aumentos en el valor de estabilidad en comparación con la mezcla de control. No obstante, con un 10% de LDPE se obtienen resultados más consistentes, con una estabilidad promedio de 32.72 kN entre los tres especímenes evaluados.

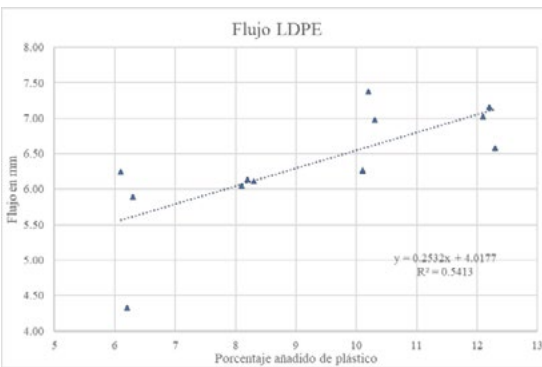


Fig. 5. Flujo contra porcentaje de LDPE añadido. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al flujo (Fig. 5), se observa una tendencia ascendente proporcional al incremento en el valor de contenido de LDPE. Sin embargo, los resultados presentan variaciones significativas, excepto en los especímenes con un 8% de LDPE, donde se registra una menor desviación y valores más estables. Esto sugiere que el porcentaje óptimo de adición de este residuo plástico se encuentra dentro de esos rangos.

4. Conclusiones

En el transcurso de esta investigación, se logró mejorar tanto la estabilidad (resistencia) como el flujo (deformación) de una mezcla asfáltica en la que se adiciona LDPE, usando el método seco sin requerir ajustes adicionales en el proceso. Los especímenes que contenían un 10% de LDPE, en relación con el peso del agregado pétreo, alcanzaron un valor promedio de estabilidad de 32.72 kN (3,336.51 kg), lo que representa un incremento de 2.4 veces en comparación con los diseños de mezclas de referencia.

Durante el proceso de compactación de la mezcla, fue necesario mantener la temperatura en el límite superior obtenido con el resultado del ensaye de viscosidad para lograr una compactación adecuada. Como resultado, el parámetro de flujo aumentó en comparación con la mezcla de control, alcanzando un valor promedio de 6.87 mm, superior al de la mezcla de control, que fue de 4.52 mm. Este incremento se atribuye a la mejora en la ductilidad de la mezcla gracias a la adición de LDPE, lo que sugiere la posibilidad de explorar la combinación de otros tipos de residuos en futuras investigaciones a fin de promover el uso de materiales reciclados e impulsar el desarrollo de procesos constructivos con menor impacto ambiental.

Agradecimientos

Agradezco a Salcan Plastic y a CEMEX Querétaro por la donación de los materiales utilizados en el análisis.

Referencias

- [1] A. Díaz, R. Tielves and B. Chirólde; "Plan de acciones de Manejo Ambiental para la mitigación de impactos ambientales de la Planta de Asfalto PC-3, de Consolación del Sur", Revista Angolana de Ciencias, vol. 3, pp. 430-450, 2021, doi: 10.54580/R0302.09. [Online]. Available:

- <https://www.redalyc.org/journal/7041/704173376009/html/>
- [2] A. Enshassi, B. Kochendoerfer and E. Rizq; “Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción”, *Revista ingeniería de construcción*, vol. 29, no. 3, pp. 234-254, 2014, doi: 10.4067/S0718-50732014000300002. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732014000300002
- [3] A. Noor and M. Rehman, “A mini-review on the use of plastic waste as a modifier of the bituminous mix for flexible pavement”, *Cleaner Materials*, vol. 4, 2022. doi: 10.1016/j.clema.2022.100059. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397622000193>
- [4] F. Adou, B. Ampadu, N. Agyepong, and O. Soli; “Assessing Plastic Waste Usage as Additives in Flexible Asphalt Mix for Road Construction”, *Civil and Environmental Research*, vol. 10, no. 2, pp. 32-38, 2018. [Online]. Available: https://www.iiste.org/Journals/index.php/CER/article/view/40934/42091#google_vignette
- [5] G. White and C. Magee, C, “Laboratory evaluation of asphalt containing recycled plastic as a bitumen extender and modifier”, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 218-235, 2019, doi: 10.17265/2328-2142/2019.05.004. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/337210894_Laboratory_Evaluation_of_Asphalt_Containing_Recycled_Plastic_as_a_Bitumen_Extender_and_Modifier
- [6] H. Naghawi, R. Alajarmeh, R. Allouzi, A. Alkloub, K. Masarwa, A. AL-Quraini and M. Abu-Sarhan, “Recycled Plastic Waste Utilization as Asphalt Binder Modifier in Asphalt Concrete Pavement”, *Researchgate*, vol. 12, pp. 566 – 571, 2019, doi: 10.5281/zenodo.1317348. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/331162985_Recycled_Plastic_Waste_Utilization_as_Aspphalt_Binder_Modifier_in_Aspphalt_Concrete_Pavement
- [7] Instituto Mexicano del Transporte, “Movilidad de pasajeros en México: Implicaciones ambientales y económicas”, Querétaro, México, Rep. no. 372, 2012. [Online]. Available: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt372.pdf>
- [8] R. Vasudevan, S. Nigam, R. Velkenedy, A. Ramalinga, C. Sekar and B. Kannan, B.Sundara. “Utilization of Waste Polymers for Flexible Pavement and Easy Disposal of Waste Polymers”, *Researchgate*, vol. 3, no. 1, 2010. [Online]. Available: <https://trid.trb.org/View/913370>
- [9] https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, “Panorama general de las tecnologías del reciclaje de plásticos en México y en el mundo”, D.F, México, 2020. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf
- [10] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, Solar Servicios Editoriales, D.F, México, 2009. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/666958/cuarta_Comunicacion.pdf
- [11] Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus, D6926-04-20, ASTM International, 2020, doi: 10.1520/D6926-20. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d6926-20.html>
- [12] Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures, ASTM D6927-22, ASTM International, 2022, doi: 10.1520/D6927-22. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d6927-22.html>
- [13] Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, D4402/D4402M-15, ASTM International, 2022, doi: 10.1520/D4402_D4402M-15R22. [Online]. Available: https://www.astm.org/d4402_d4402m-15r22.html
- [14] Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, MMP. Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales, M-MMP-4-04-001/02, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2015. [Online]. Available: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-4-04-001-02.pdf>
- [15] United Nations Environmental Programme (UNEP), 2018 “Our planet is drowning in plastic pollution”, [Online]. Available: <https://www.unenvironment.org/interactive/beating-plastic-pollution/>.

