



Revista Ciencia Aplicada

ISSN: 3122-3664

WWW.CIENCIAPLICADA.MX

Volumen 1, número 1
enero - junio 2025



Director

José Antonio Muñoz Gómez

Consejo Editorial

Abimael Jiménez Pérez


Gabriela Peña Velasco

Eduardo H. Haro

Jaime Ricardo González Romero

Jesús Ortiz Palacios

Omar Aguilar Loreto



Revista Ciencia Aplicada, año 1, núm. 1, enero-junio de 2025, es una publicación semestral editada por José Antonio Muñoz Gómez, en Ave. Lázaro Cárdenas 320, Lomas de San José, C.P. 48904, Autlán de Navarro, Jalisco, México. Página electrónica de la revista: <https://www.cienciaplicada.mx>, correo electrónico: editor@cienciaplicada.mx. Editor responsable: José Antonio Muñoz Gómez. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-103116484200-102, ISSN: 3122-3664, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: José Antonio Muñoz Gómez, Ave. Lázaro Cárdenas 320, Lomas de San José, C.P. 48904, Autlán de Navarro, Jalisco, México, fecha de última modificación: 15 de junio de 2025. Tamaño del archivo: 10390 KB

Índice

Este primer volumen es la suma de voluntades para conformar un equipo editorial multidisciplinario y representa el estado del arte del conocimiento, expresado en trabajos de difusión científica. En él convergen distintas disciplinas (física, matemáticas, materiales, química, computación, ecología, biología, inteligencia artificial y microelectrónica) con un enfoque tanto teórico como práctico. En este sentido, el volumen inaugural ofrece una perspectiva transversal donde la *Revista Ciencia Aplicada* nos permite abordar soluciones a diversas problemáticas en nuestro México contemporáneo.



Creación de una nueva Revista Científica Mexicana

J. Antonio Muñoz-Gómez

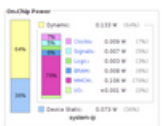
1-9



Pasta cerámica de bajo costo para impresión 3D

Juan José Avila Navarrete, José Antonio Muñoz Gómez

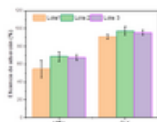
10-22



Comparación y Estudio del Desempeño de dos Sistemas Embebidos en FPGA

Abimael Jiménez-Pérez, Omar Aguilar-Loreto, Gehová López-González

23-30

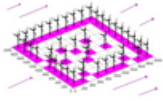


Materiales adsorbentes alternativos para la remoción de contaminantes en agua

Gabriela Peña Velasco

31-39



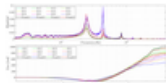


Análisis de algoritmos evolutivos contemporáneos en la optimización de distribución de parques eólicos

Eduardo H. Haro, Alfonso Ramos-Michel, Jorge Arturo Pelayo-López

40-56

 pdf

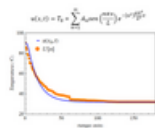


Diseño y caracterización de un tubo de impedancias con sensores acústicos de bajo costo

Jaime Ricardo Gonzalez-Romero, Adalberto Zamudio-Ojeda, Guillermo Garcia-Torales

57-69

 pdf



Análisis y Modelado de la Distribución Térmica en Morteros

Omar Aguilar-Loreto, Juan José Avila-Navarrete, Abimael Jiménez-Pérez

70-84

 pdf

Creación de una nueva Revista Científica Mexicana

J. Antonio Muñoz-Gómez

Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional 151, Autlán, Jalisco, México.

Resumen: La generación de conocimiento es un elemento vital para el desarrollo de un país. Las publicaciones científicas cumplen un papel fundamental al recopilar información de manera organizada, utilizando el método científico para presentar y validar los resultados. En este sentido, el presente artículo presenta las bases conceptuales e ideológicas para la creación de una revista de difusión científica multidisciplinaria llamada *Revista Ciencia Aplicada*. Se analiza el estado del arte en torno a la generación de conocimiento en la Universidad de Guadalajara y se presenta una comparativa con las revistas de la UNAM, evidenciando ciertas similitudes cuantitativas. Esta revista nace con el propósito de ofrecer un mecanismo formal y expedito para la publicación de trabajos realizados por estudiantes y profesores universitarios. La *Revista Ciencia Aplicada* representa un cambio en el estilo de publicación, donde el concepto de difusión-científica es retomado con profundidad abordando tanto los aspectos tecnológicos como los administrativos. Así mismo, se establece una distribución económica equitativa entre todos los actores involucrados, siendo el revisor científico la médula espinal del proceso.

1. Introducción

La creación de una revista científica surge de la necesidad de difundir el conocimiento científico. Representa el estado final del conocimiento tanto teórico como aplicado, y actúa como puente para el desarrollo tecnológico. Es el medio idóneo para comunicar los avances en el estado del arte del conocimiento y desempeña un papel primordial en los sistemas de evaluación universitarios.

La ciencia para existir debe ser publicada

Las publicaciones científicas promueven la cooperación académica, internacionaliza el conocimiento y permite comunicar, en un nivel formal, los avances en diversos campos del conocimiento.

Las revistas científicas son un canal de difusión hacia diversos organismos e instituciones, lo cual promueve una sociedad más informada y educada. Finalmente, publicar refleja el compromiso del investigador, no solo con su comunidad académica, sino también con la sociedad en general. Esto implica una responsabilidad de contribuir al bien común, compartiendo información fidedigna que pueda tener un impacto social significativo a corto o mediano plazo. La creación de una Revista Mexicana de Difusión responde a un entorno social contemporáneo. A partir de este contexto, surge la pregunta: ¿Qué nos diferencia de otras revistas de

Primer Volumen

Recibido: abril 8, 2025

Aceptado: mayo 22, 2025

autor de correspondencia:
antonio.munoz@academicos.
udg.mx

© 2025 Revista Ciencia Aplicada

difusión científica? La respuesta surge de forma natural al comprender que vivimos en un entorno dinámico, donde los cambios transforman las formas de trabajo y el concepto de publicación se amplía. Podemos expresar dos razonamientos generales: el primero responde a una realidad, y el segundo a un proceso de evaluación.

Como primera idea de pensamiento, recordemos que la publicación de artículos científicos surge en un entorno universitario, lugar donde emergen los estándares de calidad y pertinencia de las revistas científicas. Este liderazgo está normado por organismos nacionales que acreditan la modalidad de publicación. En México, existen dos organismos académicos que rigen las evaluaciones científico-académicas: el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) y el Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP).

De forma paralela, en los últimos años, ambos organismos han modificado sus lineamientos de evaluación para incorporar una nueva categoría: el artículo de difusión científica. En particular, en el 2024 la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a través del SNII, incluyó la figura de *artículo de difusión* como requisito en la evaluación. De igual forma, la Secretaría de Educación Pública, a través del programa PRODEP, eliminó la figura de publicación en congresos y reforzó el concepto de trabajo de difusión científica, en el que prevalecen los criterios generales exigidos por una publicación científica.

La incorporación de la figura de artículo de difusión complementa el trípode del conocimiento: divulgación + difusión + investigación. Los trabajos de difusión científica, al igual que los de investigación, comparten los criterios de evaluación y presentación; sin embargo, la principal diferencia estriba en la aportación substancial al estado del arte. En investigación, es un requisito obligatorio, mientras que en la categoría de difusión se prioriza la claridad de la exposición sobre la profundidad.

Finalmente, podemos decir que la propuesta de la revista es un cambio de paradigma coherente con las transformaciones actuales. Es una nueva revista donde la *Revista Ciencia Aplicada* se encuentra a la vanguardia en la gestión de conocimiento multidisciplinario. Además, se establece con una voz clara y una misión definida orientada a la difusión del conocimiento científico en beneficio de la comunidad universitaria.

2. Revistas en la Universidad de Guadalajara

Desde la fundación de la primera universidad en México, llamada Real Universidad de México en 1553, la difusión del conocimiento generado en los campus universitarios ha sido una piedra angular de la labor científica a lo largo de casi 500 años.

La difusión de la ciencia es uno de los ejes fundamentales en las universidades, tanto a nivel nacional como internacional. En la Universidad de Guadalajara (UdeG), esta labor se articula a través de las funciones sustantivas: docencia, investigación, extensión y difusión de la cultura, suscritas al Plan de Desarrollo Institucional 2019-2025. En este sentido, la creación de revistas científicas que respondan a las necesidades contemporáneas es una necesidad imperiosa, orientada a dar respuestas a los cambios de paradigma y a los nuevos criterios de evaluación dentro de los sistemas de evaluación docente.

La Tabla 1 se muestra un compendio de los campus universitarios que conforman la red universitaria de la UdeG. Los datos fueron adquiridos en su portal web de investigación.

Tabla 1. Relación de revistas en la Universidad de Guadalajara (mayo 2025).

Centro Universitario Regional	Revistas	Centro Universitario Temático	Revistas	Centro Universitario Virtual	Revistas
CUTlajomulco	--	CUAAD	5	SUV	3
CUValles	--	CUCBA	4		
CUTonalá	2	CUCEA	8		
CUSur	1	CUCEI	3		
CUNorte	1	CUCSH	19		
CULagos	--	CUCS	4		
CUCSur	--				
CUCosta	3				
CUCiénega	3				
CUAltos	1				
sub-total	10	sub-total	43	sub-total	3
				total	56

Los elementos están divididos en tres categorías: los centros universitarios regionales, los centros temáticos y el Sistema de Educación Virtual (SUV). Al considerar el número de revistas como un indicador del desarrollo y madurez institucional en materia de investigación y difusión de la ciencia; los datos indican que los centros temáticos han alcanzado un desarrollo científico tres veces mayor que los centros regionales. Por otro lado, es notable el desarrollo del SUV, que actualmente cuenta con tres revistas, dos de las cuales están en el índice de revistas SECIHTI. El SUV puede considerarse como un campus universitario debido a que oferta nueve programas de licenciatura y nueve posgrados.

En análisis las revistas pertenecientes a los centros regionales, revela que ninguna revista aborda áreas relacionadas a las ciencias aplicadas o de corte científico clásico (p.e. matemática, física o ingeniería civil). Por otro lado, al examinar en detalle las 56 revistas de los centros temáticos, se identificaron que únicamente se cuenta con tres revistas de difusión científica llamadas: e-gnosis (CUCEA), Educación Matemática (CUCEI), y Recibe (CUCEI). Este análisis evidencia

una necesidad latente de desarrollar nuevas modalidades de revistas editoriales que brinden a la comunidad científica de las ciencias exactas y aplicadas un espacio para la difusión de sus proyectos de investigación.

De forma natural surge la pregunta: ¿por qué la cultura de creación de revistas se ha desarrollado de forma exigua en los centros regionales? La respuesta tiene diversos matices. Antes de intentar abordarla, es importante tener en mente que la UdeG se encuentra en un proceso de continua expansión, con la creación de nuevos centros universitarios. Este crecimiento implica la contratación de nuevos profesores-investigadores que en su mayoría son incorporados a los nuevos campus; esto ocasiona que los campus regionales establecidos crezcan a una menor tasa en la captación de nuevos científicos, lo que limita su capacidad para desarrollar proyectos editoriales consolidados.

Aunado a ello, existe una presión constante para generar, en el corto plazo, de resultados publicables que son requeridos en los sistemas de evaluación académica, como son los Cuerpos Académicos, el Programa para el Desarrollo Profesional Docente y el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Esta dinámica genera un entorno de estrés en el profesorado y concentra los esfuerzos en el presente, en el ahora. Por otro lado, la creación de una nueva revista requiere de un entorno social particular: de un equipo de trabajo cohesionado, con una visión sólida, y un proceso a largo plazo. La creación de la *Revista Ciencia Aplicada* es un reflejo de esta visión a largo plazo, sustentada por un grupo consolidado de académicos.

En las áreas de ciencias exactas e ingenierías, es común medir el desarrollo de un proceso. Por esta razón, realizaremos una comparativa con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), reconocida por diversos organismos evaluadores como la mejor universidad del país. Por otro lado, la Universidad de Guadalajara se mantiene de manera constante dentro de las diez mejores instituciones educativas a nivel nacional.

Actualmente la UNAM cuenta con 6,361 miembros del SNII y un total de 167 revistas científicas. La UdeG tiene registrados 2,137 miembros del SNII y cuenta con 56 revistas. Extrapolando linealmente los datos de la UdeG podemos deducir que:

$$(56/2137) \cdot (2137 + 4224) \rightarrow 167 \text{ revistas}$$

esto nos muestra que, en términos proporcionales, la UdeG cuenta con una cantidad similar de revistas respecto al número de miembros del SNII. Es decir, si la universidad tuviera 6,361 investigadores en el SNII, podría esperarse tener 167 revistas. Lo cual es una cifra equivalente a la obtenida por la UNAM. Sin embargo, la diferencia radica en la calidad y reconocimientos de las revistas, la UNAM cuenta

con 57 revistas en el índice de revistas científicas del CONAHCyT, mientras que la UdeG solo tiene 11 revistas registradas, en el área de ciencias sociales.

Esta situación refleja una gran oportunidad para impulsar la creación de revistas científicas que fortalezcan el desarrollo de las ciencias exactas y aplicadas. Por último, al analizar los años de fundación de ambas universidades, se observa que poseen una antigüedad comparable, lo que hace aún más relevante la comparación.

Fundación UdeG: 1925

Fundación UNAM: 1910

Estos datos han sido presentados a diversos investigadores, científicos y académicos que han expresado que no es justo comparar los resultados obtenidos, ya que existen factores sociales, económicos y, sobre todo, políticos que moldean la realidad de cada institución educativa. En cierto modo, tienen razón; sin embargo, la finalidad de este estudio no es explicar las diferencias de visión entre las distintas universidades. Por el contrario, busca mostrar la imperiosa necesidad que tenemos los profesores universitarios de construir los andamiajes para fortalecer nuestras instituciones y lograr una mayor presencia a nivel nacional e internacional en la gestión de revistas científicas. La Universidad de Guadalajara cuenta con el talento y el capital humano para alcanzar una mayor presencia científica en Latinoamérica.

3. Revista Multidisciplinaria

La creación de la *Revista Ciencia Aplicada* comenzó en 2022. En un inicio, la revista se planteó como un foro para la publicación de trabajos de estudiantes de posgrado. No obstante, esta visión fue evolucionando hasta convertirse en una plataforma más amplia y con una visión interdisciplinaria para la difusión de la ciencia.

El mayor avance se ha realizado durante el 2024, en este periodo se integró el grupo multidisciplinario que ha permitido otorgarle una visión clara y un alcance definido como:

La Revista Ciencia Aplicada tiene un enfoque multidisciplinario con un carácter transversal a las diferentes expresiones del conocimiento. El propósito es difundir a nivel internacional la producción científica de investigadores jóvenes y consolidados, desde una perspectiva tanto teórica como aplicada. La revista facilita una comunicación rápida de trabajos científicos, donde el eje transversal es la ciencia y su interrelación con los diversos campos del conocimiento. Está especialmente diseñada para reportar resultados de tesis de licenciatura, maestría, doctorado, y las investigaciones realizadas por profesores universitarios.

La revista cuenta con hoja legal, ISSN, y los artículos publicados son reconocidos en los distintos organismos, como cuerpos académicos, PRODEP y SNII.

Cabe destacar que la revista está especialmente diseñada para la difusión de resultados de tesis de licenciatura, maestría, doctorado, así como de las investigaciones desarrolladas por profesores universitarios. Este enfoque constituye el principal elemento diferenciador frente a otras revistas científicas, debido a que responde a los cambios administrativos actuales. A continuación, en forma de listado indicamos las principales fortalezas:

- **Hoja legal:** en los sistemas de evaluación se requiere anexar al expediente la hoja legal de la revista por cada artículo publicado. En un análisis realizado a más de 100 revistas nacionales e internacionales, no se identificó un apartado que incluyera explícitamente la hoja legal. La revista provee este mecanismo, lo cual reduce los tiempos administrativos y brinda certidumbre en los criterios de evaluación.
- **Claridad:** los trabajos originales sometidos a la *Revista Ciencia Aplicada* tienen como énfasis principal una presentación clara y concisa. Este rubro es un diferenciador que privilegia la calidad en la redacción y la claridad en la exposición. Con este enfoque, se abre la posibilidad de recibir trabajos escritos por estudiantes de todos los niveles, así como contribuciones originales de profesores universitarios.
- **Pertenencia:** la revista tiene un enfoque multidisciplinario, dirigido a todas las ramas de las ciencias aplicadas. Este corte es novedoso porque proporciona un nicho semi-especializado; es decir, es un foro donde convergen áreas como las ciencias exactas, ingenierías, agropecuarias, biológicas, químicas y del medio ambiente. Ofrece un espacio para la reflexión y la propuesta de soluciones a diversas problemáticas.
- **Doble ciego:** la evaluación de cada trabajo se realiza bajo el sistema de revisión por pares doble ciego, que garantiza el anonimato tanto del autor como de los evaluadores.
- **Publicación continua:** un artículo se publica tan pronto como ha sido aprobado y se han incorporado las correcciones necesarias. Este mecanismo aporta vitalidad al proceso editorial y permite que los autores puedan hacer uso de sus artículos aceptados en los sistemas de evaluación.

Es conveniente señalar que la revista no tiene como objetivo contribuir con trabajos inéditos que busquen fortalecer el estado del arte en la ciencia. Este propósito está cubierto por las revistas indexadas en el Journal Citation Report (JCR). Por el contrario, *Revista Ciencia Aplicada* ofrece un medio claro, formal y expedito para la difusión de trabajos de corte científico a nivel nacional como

internacional, dirigido a profesores y estudiantes. Estos trabajos son plenamente reconocidos en todos los sistemas de evaluación formativos.

4. Hoja Legal

La revista cuenta con un sitio web oficial: www.cienciaplicada.mx, alojado en un servidor propio. Actualmente opera con la versión 3.4 del Open Journal System (OJS), liberada el 23 agosto del 2024. El portal web contiene los elementos clásicos de una revista científica: Inicio, Sobre la revista, Directorio, Archivos, Formatos, y Costos de Publicación. Además, incorpora un apartado de Hoja Legal, el cual contiene los siguientes datos:

Título: Revista Ciencia Aplicada

Arbitraje: Sistema doble diego

Periodicidad: Publicación continua, dos tomos por año.

ISSN: en trámite

Reserva de derecho de autor: 04-2024-103116484200-102

Vigencia: 31-Octubre-2024 – fecha actual

Alcance: Publicaciones científicas a nivel internacional

Esta característica facilita los procesos de evaluación ante diversos organismos, debido a que proporciona la información de forma clara y expedita. Cuando una revista no proporciona una Hoja Legal, recae en el usuario la responsabilidad de elaborarla. Lo cual conlleva incertidumbre y es propenso a errores. Al contar con este apartado, se facilita el post-proceso de la información y se agiliza el trabajo administrativo.

5. Asociación civil sin fin de lucro

La sociedad civil desempeña un papel fundamental en la identificación y atención de diversas problemáticas de carácter social. Estas organizaciones, integradas por la propia ciudadanía, se enfocan principalmente en causas como el apoyo a orfanatos, la distribución de alimentos en dispensarios, la atención a adultos mayores en asilos, la prevención del cáncer en mujeres, enfermedades autoinmunes, entre muchas otras. En México, se encuentran registradas más de 50,000 asociaciones civiles dedicadas a estas labores.

En el ámbito de la educación universitaria, coexisten diversas asociaciones civiles sin fin de lucro que trabajan de forma conjunta con universidades públicas para la creación y operación de revistas científicas, en todos los campos de las ciencias exactas, naturales y sociales. Una de las asociaciones científicas más emblemáticas es la Sociedad Matemática Mexicana (SMM), cuya versión moderna data de 1943, esta sociedad surge de la necesidad para resarcir el gran atraso de las matemáticas en México. La experiencia de 82 años de trabajo, ha permitido que la SMM sea una institución pilar para el desarrollo de eventos académicos a nivel nacional e

internacional, y provee el soporte científico en diversas categorías de revistas. Entre ellas destaca el Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana, revista hospedada por la editorial Springer-Birkhäuser. La cual opera bajo el modelo de acceso abierto, con un costo promedio de \$50,000 (cincuenta mil pesos mexicanos).

La publicación de trabajos en la *Revista Ciencia Aplicada* tendrá un costo de \$2,000 (dos mil pesos mexicanos). Este costo es necesario para la operación exclusivamente de la revista. La distribución del ingreso se realizará de la siguiente manera: a) 25% pago a los revisores, b) 10% maquetador, c) 10% corrector estilo, d) 20% pago de servicios, y e) 35% promoción. El enfoque innovador de este modelo radica en establecer un pago único a los revisores del trabajo sometido.

En la comunidad académica, existe reticencia a participar como revisor, en parte debido a la carga de trabajo, y a la ausencia de una compensación económica por el trabajo realizado. La propuesta de remunerar esta labor dignifica el trabajo realizado y contribuye a fortalecer el tejido social académico, en el que todos los actores contribuyen y reciben reconocimiento. Hasta donde tenemos conocimiento, esta es la primera revista a nivel nacional que plantea un modelo de distribución económica.

Para la operación de la revista, se contempla la creación de una figura legal que otorgue el respaldo formal para la administración y gestión. Por esta razón, se conformará la Sociedad Mexicana de Difusión Científica como una Asociación Civil (A.C.) sin fin de lucro. A través de ella, podremos emitir facturas y realizar las transacciones económicas necesarias, con el único objetivo de fortalecer y promover la revista en beneficio de los profesores universitarios. Este esquema de administración surge a partir de una visión de emprendimiento, fomentada por los diplomados y programas de capacitación ofertados en la Universidad de Guadalajara.

Tabla 2. Relación de revistas de ingenierías –área 7- del sistema de clasificación de revistas mexicanas de ciencia y tecnología.

Nombre de la Revista	Casa Editorial
Computación y Sistemas	Instituto Politécnico Nacional
Revista Mexicana de Geotermia	Comisión Federal de Electricidad
Ingeniería Investigación y Tecnología	Universidad Autónoma de México
Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo	Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A.C.
International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics	Editorial Académica Dragón Azteca
Polibits	Instituto Politécnico Nacional
Revista ALCONPAT	ALCONPAT Internacional A. C.
Revista Ingeniería Sísmica	Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A. C.
Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica	Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica

Revista Mexicana de Ingeniería Química	Universidad Autónoma Metropolitana
Tecnología y Ciencias del Agua	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Existe un número creciente de revistas que son creadas y administradas por sociedades y asociaciones civiles. En la Tabla 2 se muestran las revistas del área 7 del sistema de clasificación de revistas reconocido por el CONAHCyT. Cabe mencionar que en la convocatoria 2025 de Ciencia Básica y de Frontera de la SECIHTI, entre los criterios de evaluación se incluye que “al menos una publicación en una revista mexicana de acceso abierto”. Por lo cual, la generación de conocimiento en nuestro idioma y de acceso abierto es de vital importancia para el desarrollo de nuestro país.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, de las 11 revistas listadas solamente cuatro son responsables directas de la edición, promoción y patrocinio. El 63% de las revistas operan de forma híbrida: los derechos de autor, así como la gestión editorial están bajo el liderazgo académico de particulares, representado mediante sociedades civiles. De manera conjunta, los espacios operativos e insumos variados son auspiciados por las universidades. Esta sinergia de trabajo colaborativo entre la universidad y la sociedad civil es una amalgama que propicia el desarrollo y permite agilizar los procesos para la promoción y la adopción de nuevos modelos de gestión en las revistas científicas.

6. Conclusiones

En este primer número de la *Revista Ciencia Aplicada* se presenta un panorama general que propició la creación de esta publicación científica. Asimismo, se ofrece un diagnóstico del estado actual de las revistas de divulgación científica al interior de la Universidad de Guadalajara, y se realiza una comparativa con la UNAM. Se observa que existe una necesidad latente de crear y gestionar nuevas revistas de corte científico en las áreas de ciencias e ingenierías.

La creación de esta revista es resultado de la suma de voluntades de académicos provenientes de diversas áreas temáticas y de distintas universidades mexicanas. El objetivo es ofrecer un mecanismo ágil y formal para la difusión de trabajos científicos, donde la celeridad como la calidad del proceso editorial constituyen los pilares angulares en su fundación. Esta clase de publicaciones fomenta la incorporación temprana a la ciencia, al servir como una plataforma para la difusión temprana de investigaciones científicas. La *Revista Ciencia Aplicada* busca ser un canal donde los investigadores, estudiantes y docentes puedan compartir sus trabajos, experiencias y descubrimientos con una audiencia más amplia.

Finalmente, consideramos que las aportaciones publicadas en esta revista contribuyen al desarrollo científico de nuestro país. Por ello, extendemos una cordial invitación a la comunidad académica a formar parte de este esfuerzo, publicando en nuestra naciente revista.

Pasta cerámica de bajo costo para impresión 3D

J. J. Avila-Navarrete¹, J. Antonio Muñoz-Gómez²

¹Estudiante Posgrado Ciencia e Ingeniería de Materiales, Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional No. 151, Autlán, Jalisco, México

²Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional No. 151, Autlán, Jalisco, México

Resumen: Los métodos de fabricación aditiva basados en la extrusión han surgido como una propuesta contemporánea para el desarrollo de nuevos materiales. En este trabajo se propone el desarrollo de una pasta cerámica para impresión 3D de bajo costo con materiales comerciales y de fácil acceso. Lo cual es una alternativa accesible para la manufactura aditiva cerámica en contextos académicos y de laboratorio. La pasta acrílica (Ready-Mix) es modificada mediante la adición de caolín y cemento blanco, para mejorar la resistencia mecánica y su comportamiento dinámico en procesos de extrusión. Se incorporó caolín (0–30%) y cemento blanco (10%). La formulación con 20% de caolín mostró la mejor relación entre estabilidad estructural y resistencia a la compresión (6.32 MPa a 35 días). Las piezas elaboradas tienen geometrías complejas con un acabado superficial homogéneo, lo cual demuestra la factibilidad de la propuesta.

1. Introducción

En las últimas décadas, la manufactura aditiva (impresión 3D) ha incidido en diversos campos de las ciencias y las ingenierías, tales como la arqueología, industria automotriz y militar, fabricación de prótesis médicas, componentes aeroespaciales, diseño de calzado deportivo y, recientemente la impresión 3D in-situ de estructuras habitacionales [1-4]. La tecnología para imprimir objetos tridimensionales se originó hace tres décadas con el desarrollo de la fotopolimerización de resinas cerámicas mediante máquinas de control numérico computarizado (CNC) [5]. No obstante, su masificación global ocurrió durante la última década, impulsada por la adopción de impresoras de extrusión de material fundido por capas (FDM, Fused Deposition Modeling), las cuales redujeron costos y crearon una cultura de innovación [6].

El auge de la impresión tridimensional se debe, en gran medida, a la capacidad de fabricar estructuras complejas de forma eficiente y personalizada, la fabricación en casa, y costes cada vez menores. Esto ha ampliado significativamente las posibilidades de diseño-experimentación y ha democratizado su fabricación en universidades y laboratorios [7, 8]. Aunado al desarrollo de impresión con polímeros, en los últimos años ha emergido la impresión 3D de objetos con pastas cerámicas, las cuales son consideradas como materiales de alto rendimiento debido a su dureza, alta resistencia al desgaste, a la temperatura y a la corrosión, así como

Primer Volumen

Recibido: mayo 8, 2025

Aceptado: mayo 22, 2025

autor de correspondencia:
antonio.munoz@academicos.
udg.mx

© 2025 Revista Ciencia Aplicada

a sus buenas propiedades mecánicas. Tiene incidencia en industrias modernas como la energética, aeronáutica, militar y química, entre otros [9, 10].

En este trabajo se aborda la técnica de extrusión directa de pasta (DIW, Direct Ink Writing), un método de impresión 3D basado en la extrusión de materiales viscosos, como pastas cerámicas, mediante el control preciso de la velocidad y presión de flujo. Este método permite depositar el material capa por capa a través de una boquilla. Las ventajas de la técnica DIW son: (a) incorporación de nuevos agregados al material base, (b) costo reducido del equipo, y (c) pérdidas mínimas del material durante el proceso de impresión.

En el trabajo de Chen et al. [11], se revisaron los avances recientes en la impresión 3D de cerámicas, incluyendo técnicas como la estereolitografía (SL), el procesamiento digital de luz (DLP) y DIW. Los autores destacaron que estas tecnologías permiten la fabricación de componentes cerámicos con geometrías complejas que son difíciles de lograr con métodos tradicionales.

La conversión de una impresora clásica FDM a una impresora para cerámicos fue desarrollada en 2022. Mediante la modificación de la estructura y el cabezal de impresión, se logró trabajar con una mezcla de arcilla cerámica de la marca WASP, utilizando relaciones agua/arcilla entre 0.57 y 0.69. Los resultados demostraron la viabilidad de imprimir formas complejas, con una resistencia a la compresión de hasta 9.6 N/mm^2 después del secado y cocción [12].

Revelo y Colorado analizaron la impresión 3D de cerámicas basadas en arcilla de caolinita utilizando la técnica DIW. Optimizaron la relación agua/arcilla (W/C) y determinaron que una W/C de 0.60 proporcionaba el mejor equilibrio entre fluidez y estabilidad dimensional durante la impresión. Tras la sinterización a 1100°C , las muestras impresas alcanzaron una resistencia a la compresión de 20-50 MPa [14].

En Ordóñez et al., se investigó la impresión 3D tipo DIW, utilizando una pasta cerámica de uso industrial proporcionada por la empresa Suministros de Colombia S.A.S., y aditivos como silicato de sodio y poliacrilato de sodio. Las formulaciones con 50% de pasta y poliacrilato de sodio mostraron la mejor estabilidad dimensional y resistencia a la compresión (hasta 264 MPa), con una menor contracción durante el secado y sinterización. El estudio concluyó que la técnica DIW es viable para fabricar componentes cerámicos complejos, con aplicaciones en la construcción y la manufactura tradicional [15].

La formulación basada en arcilla fue analizada por Alonso Madrid et al., quienes abordaron la impresión desde una perspectiva de sostenibilidad, utilizando arcillas comerciales y enfocándose en su reutilización en el sector de la arquitectura, ingeniería y construcción. Se analizaron aspectos técnicos como la extrusión, la pérdida de propiedades según el tipo de protección y la reutilización de la arcilla en múltiples ciclos de impresión. Los resultados demostraron que la arcilla puede

reutilizarse indefinidamente si se protege de la exposición directa a materiales húmedos como el cemento, manteniendo sus propiedades plásticas [16].

En este trabajo, se desarrolla una pasta cerámica de bajo costo –basada en resinas acrílicas- para impresión 3D. La base es la pasta comercial Ready-Mix, la cual es modificada experimentalmente mediante la incorporación de caolín (0-30%), cemento (10%) y bórax (0.5%). Estas adecuaciones modifican las propiedades reológicas y proveen de una extrusión estable. Asimismo, se busca evaluar el desempeño mecánico del material a través de ensayos de compresión, así como analizar la morfología y estabilidad de las piezas generadas tridimensionalmente.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2, se describe la metodología para transformar una pasta cerámica comercial para su uso en impresión 3D. Asimismo, se muestra el proceso de caracterización y la impresora 3D. En la Sección 3, se analizan los datos obtenidos de la micrografía y las pruebas de dureza del material compuesto, además se muestran diversas piezas impresas tridimensionalmente. Por último, en la Sección 4, se exponen las principales conclusiones.

2. Metodología

En esta sección se describe el procedimiento para modificar la pasta cerámica comercial Ready-Mix, con el objetivo de transformarla para su uso en impresoras 3D cerámicas. Aunado a ello, se describe la metodología para realizar la resistencia a la compresión, y se muestra a detalle la impresora utilizada.

Los materiales empleados en este estudio incluyeron: caolín comercial (PROMI), cemento blanco Portland CPC 30R-B (CEMEX), borato de sodio (Fafgalab), y pasta comercial Ready-Mix Estándar Plus (Panel Rey). La pasta es utilizada como base en las formulaciones, es un producto monocomponente a base de resinas acrílicas, cuyo uso es el de un compuesto blanco multiusos, con excelente capacidad de adherencia, especialmente formulado para aplicaciones iniciales, tratamiento de juntas y trabajos de resane en paneles de yeso, principalmente en interiores. Asimismo, es adecuada para reparaciones superficiales y procesos de restauración en ambientes domésticos.

La pasta Ready-Mix está compuesta por agua, sulfato de calcio, carbonato de calcio, minerales, adhesivos vinílicos y otros aditivos. Este material cumple con la norma ASTM C-475, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM C-474. No contiene asbesto, lo que garantiza su seguridad en aplicaciones constructivas. Entre sus propiedades físicas destacan una excelente adherencia, densidad entre 1.62 y 1.75 g/cm³, bajo encogimiento y alta resistencia al agrietamiento. Estas características brindan la posibilidad de utilizarla como elemento base para la creación de un nuevo material para impresión 3D [17-19]. La

dureza final del material y su homogeneidad en la impresión son características que se incorporan mediante la adición de cemento y caolín.

El caolín se incorporó en las proporciones de 0%, 10%, 20% y 30%, en relación con la masa total seca de la formulación. El contenido de cemento y bórax se mantuvo constante en 10% y 0.5%, respectivamente. Estas proporciones fueron seleccionadas para evaluar sistemáticamente el efecto del caolín en las propiedades físicas, mecánicas y estéticas de las pastas cerámicas impresas.

Las formulaciones se identificaron mediante una nomenclatura basada en el porcentaje de caolín presente en la mezcla, utilizando la letra "C" seguida del valor correspondiente. Por ejemplo, la formulación C10 indica un 10% de caolín en la mezcla. En la Tabla 1 se detallan las proporciones exactas de cada componente para las cuatro formulaciones estudiadas, proporcionando una referencia clara para la reproducibilidad del estudio.

Tabla 1. Formulaciones respecto a la masa total.

Formulación	Caolín (%)	Cemento (%)	Bórax (%)	Ready-Mix (%)
C0	0	10	0.5	89.5
C10	10	10	0.5	79.5
C20	20	10	0.5	69.5
C30	30	10	0.5	59.5

El proceso de preparación de la pasta cerámica comenzó con tamizar los polvos a través de un tamiz de malla 140 (100 μ m) para eliminar impurezas y asegurar una distribución uniforme de las partículas. Posteriormente, se pesaron siguiendo las proporciones establecidas en la Tabla 1. Las mediciones se realizaron utilizando una balanza digital de alta precisión (Boeco, modelo BAS 31 plus). Los polvos (caolín, cemento y bórax) se mezclaron manualmente en seco en un recipiente de acero inoxidable, asegurando una distribución uniforme y previniendo la formación de grumos que pudieran comprometer la homogeneidad de la mezcla.

Cabe resaltar que para la etapa anterior de mezclado se creó un agitador helicoidal de dimensiones 10 cm (largo) x 8 cm (ancho). Este dispositivo fue impreso en 3D empleando un filamento ABS de la marca Bambu Lab. Este elemento fue acoplado a un taladro eléctrico y operado a una velocidad angular constante de 300 rpm durante 5 minutos.

Posteriormente, se incorporó de forma gradual la pasta Ready-Mix, la cual contiene un 45% de agua. Este paso se realizó mientras se mantenía la agitación mecánica constante durante 10 minutos, logrando una dispersión uniforme de la pasta Ready-Mix en la mezcla. La adición gradual de este componente permitió evitar la formación de grumos y asegurar una integración homogénea de los materiales.

Para finalizar, se realizó un amasado manual con el objetivo de ajustar la consistencia de la pasta. Este proceso de amasado manual se prolongó por un período de 10 minutos. Este proceso permitió eliminar burbujas de aire y garantizar una pasta homogénea.

2.1 Resistencia a la compresión

La evaluación de las propiedades mecánicas de materiales cerámicos endurecidos es fundamental para determinar su desempeño estructural y aplicabilidad en diversos campos de la ingeniería. En este estudio, se emplearon ensayos de compresión para caracterizar el comportamiento mecánico de las pastas cerámicas, analizando diferentes períodos de curado.

El ensayo a compresión se llevó a cabo conforme a la norma ASTM C109/C109M-21. Para ello, se fabricaron especímenes cúbicos de 50 mm × 50 mm × 50 mm utilizando moldes de acero inoxidable, ver Figura 1.

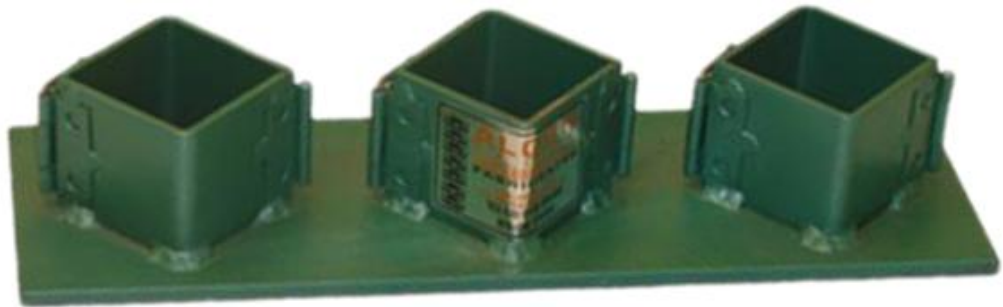


Figura 1. Moldes para cubo de mortero 50 mm x 50 mm x50 mm de la marca Alcon.

Los especímenes fueron sometidos a períodos de curado de 7, 14, 28 y 35 días en una cámara con condiciones controladas, manteniendo una temperatura constante de 25 ± 2 °C y una humedad relativa del $65 \pm 5\%$. Transcurrido el tiempo de curado, se realizaron ensayos de compresión axial en una prensa hidráulica CONTROLS (Figura 2).



Figura 2. Prensa de compresión de la marca CONTROLS.

La velocidad de carga se mantuvo constante en 1000 N/s, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM C109/C109M-21. La carga se aplicó hasta alcanzar la falla del material, definida como el punto en el que la muestra experimenta fractura.

2.2 Impresora 3D

La impresión 3D con cerámica es una alternativa mucho más rápida que los métodos tradicionales de fabricación de cerámica, reduciendo el tiempo de producción hasta en un 75% [20]. Esta nueva tecnología no solo ahorra tiempo, sino que también permite a los diseñadores una mayor libertad en sus procesos creativos y permite realizar cambios en sus diseños durante el proceso de producción.

Para la fabricación de las piezas cerámicas se utilizó una impresora 3D Tronxy Moore 1 (ver Figura 3), especializada en la extrusión de materiales viscosos. Esta impresora pertenece a la categoría de gama baja, lo que la convierte en una herramienta ideal y asequible para laboratorios y escuelas de todo el mundo. Las partes principales que conforman a la impresora son: (a) mesa desplazable en las coordenadas cartesianas X-Y, (b) mini-extrusor ubicado en la parte superior de la máquina, la cual funciona como el eje Z, (c) una interfaz de control, requerida para hacer los ajustes de configuración, y (d) un extrusor sin fin, el cual se encarga de suministrar el flujo de la pasta cerámica hacia la impresora de manera continua.

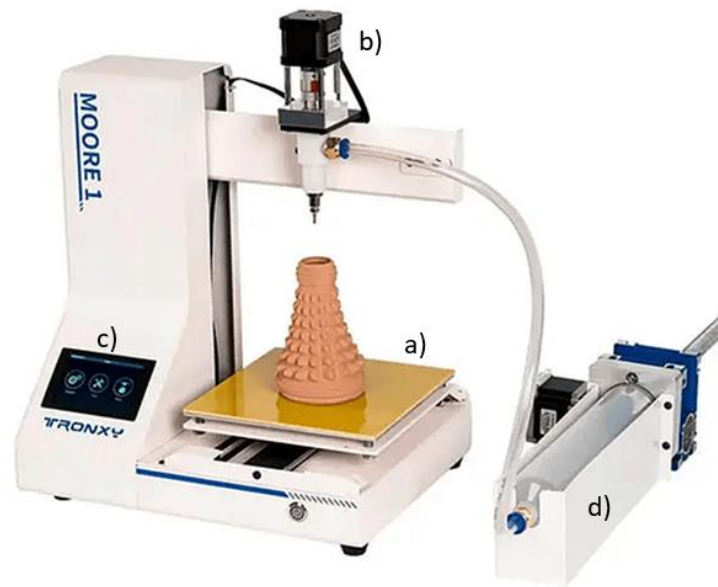


Figura 3. Impresora cerámica 3D, marca Tronxy.

Parte del proceso de investigación, consistió en realizar diversas pruebas para determinar los parámetros de impresión, tales como: altura de capa, velocidad de impresión y flujo de extrusión. Esta velocidad es crítica para controlar el flujo de salida de la pasta, evitando fluctuaciones que puedan comprometer la estabilidad de la impresión. En la sección siguiente, se analizan a detalle la influencia de estos parámetros en el proceso de impresión.

3. Resultados Experimentales

En esta sección, se estudian las diferentes composiciones de la pasta cerámica a través del análisis cualitativo de sus propiedades físicas y mecánicas. El diseño de las piezas fue realizado empleando el software SolidWorks, para la generación del g-code empleamos la aplicación Cura 15.05.4, esto permite el control automático de los motores a pasos y los extrusores.

3.1 Resistencia a la compresión

Como primer resultado, en la Figura 4 se muestra la evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado para diferentes formulaciones (C0, C10, C20 y C30). Estas corresponden a mezclas con 0%, 10%, 20% y 30% de caolín, respectivamente. En cada formulación se agregó un 10% de cemento, 0.5% de bórax y el complemento pasta Ready-Mix. En la gráfica, se observa un aumento en la resistencia a la compresión a medida que avanza el tiempo de curado en todas las formulaciones. Esto es atribuible principalmente a la hidratación del cemento y la formación de fases cristalinas que actúan como refuerzo en la matriz [21].

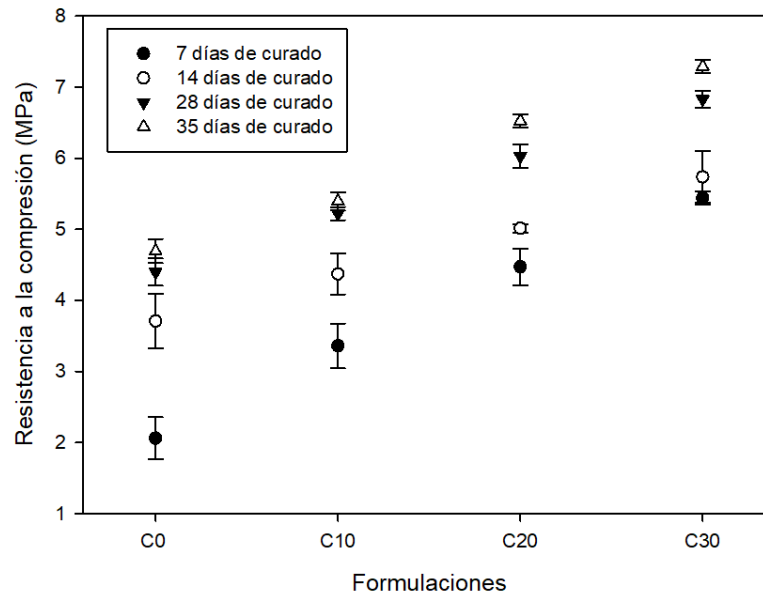


Figura 4. Evolución de la resistencia a la compresión de pastas cerámicas con diferentes porcentajes de caolín en función del tiempo de curado.

La formulación C0, sin caolín, mostró un incremento final del 114% en el valor de la resistencia: inició con 2.06 MPa a los 7 días de curado, hasta alcanzar un desempeño de 4.69 MPa a los 35 días de curado. Sin embargo, esta ganancia es inferior a las formulaciones realizadas con caolín, confirmando así la contribución significativa del agregado a la resistencia mecánica a la compresión.

El modelo matemático (MM) que describe el comportamiento de la resistencia a la compresión a 35 días de curado puede ser expresado como una línea recta. En particular, el ajuste por mínimos cuadrados queda expresado como:

$$y_R = 0.85 \times \text{formulación} + 3.6 \quad (1)$$

donde y_R queda expresado en MPa. Esta expresión es un modelo matemático que nos caracteriza el comportamiento lineal en la resistencia mecánica con respecto de la adición de caolín: conforme incrementamos el valor de caolín en 10%, se obtiene una ganancia de $0.85 \times 10\% = 8.5\%$. Lo cual es un indicador diferencial que nos permite predecir la ganancia para diferentes valores de caolín. Por ejemplo, para una formulación con 25% de caolín, se tendría un desempeño de 6.52 MPa.

En la Figura 5 se observa una tendencia de convergencia en el diferencial de la resistencia a la compresión conforme aumenta la modificación de la pasta cerámica.

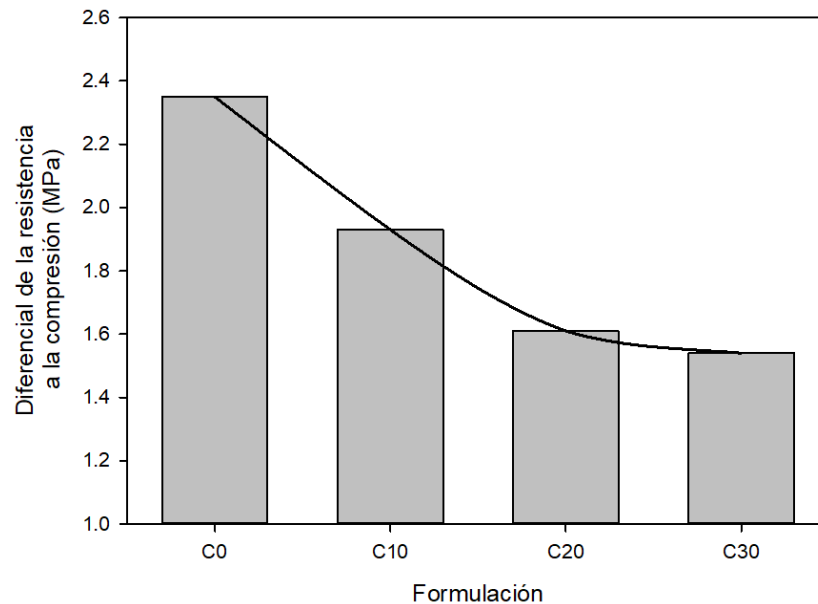


Figura 5. Resistencia a la compresión final-inicial, variando la formulación de la pasta cerámica.

En línea continua podemos apreciar que conforme incrementamos la cantidad de caolín (C10, C20 y C30), la curva tiende a un valor constante. Este comportamiento asintótico sugiere que las formulaciones alcanzan un estado de saturación mecánica. Para un porcentaje de caolín mayor al 30%, la resistencia mecánica no se incrementará. Esta homogeneización de las propiedades estructurales puede entenderse como una consecuencia de la limitación química del sistema: el cemento genera una cantidad finita de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , disponible para reaccionar con el caolín calcinado. Cuando la proporción de caolín es alta, el Ca(OH)_2 resulta insuficiente para activar la reacción puzolánica en el excedente de material. Como resultado, el caolín adicional no participa en la formación de fases cementicias y actúa como un componente inerte, sin contribuir al refuerzo mecánico.

3.2 Piezas con geometría simple

En la Figura 6 se muestran cubos de 25 mm, en cada una de sus caras, impresos con las distintas formulaciones de caolín: C0, C10, C20 y C30. En todos los casos, los parámetros de impresión se mantuvieron constantes. Esto permitió analizar visualmente el proceso final de la impresión y su morfología; reflejando la influencia de la composición de la pasta en la estabilidad dimensional y en la calidad del acabado superficial.



Figura 6. Variación de caolín en la pasta impresa: a) 0% caolín, b) 10% caolín, c) 20% caolín, y d) 30% caolín.

Las piezas mostradas en la Figura 6a y 6b exhiben un colapso parcial de las capas superiores, acompañado de deformaciones laterales debido a una insuficiente estabilidad estructural durante la deposición del material. En particular, en la Figura 6a se observa una alteración significativa en la alineación de las capas, mientras que en la Figura 6b la deformación es más homogénea, con un ensanchamiento en la base.

En contraste, las estructuras en la Figura 6c y 6d presentan una morfología más definida, con capas mejor alineadas y una mayor estabilidad geométrica. No obstante, la Figura 6d muestra ligeras irregularidades en las capas inferiores, lo que indica variaciones en la fluidez de la pasta durante la extrusión. De este análisis se aprecia que la Figura 6c (20% caolín) exhibe una buena definición estructural con líneas uniformes y bien definidas.

3.3 Piezas con geometría compleja

En la Figura 7a se muestra un recipiente hueco de arcilla (tipo *bowl*) fabricado mediante la impresión 3D con la pasta cerámica modificada. El objeto exhibe una estructura compleja, caracterizada por la disposición de curvas horizontales que son desplazadas en el eje vertical, lo cual genera un efecto visual de distorsión radial. Aunado a ello, las líneas de contorno presentan una buena definición, obteniendo una estructura sólida helicoidal.

Por otro lado, la estructura presentada en la Figura 7b evidencia una morfología distinta, caracterizada por la presencia de texturas más pronunciadas a lo largo de

la superficie, con ligeros colapsos superficiales. Dichas irregularidades pueden estar asociadas a diferencias en la viscosidad y tixotropía de la pasta C30. En trabajos futuros se analizará con más detalle las características reológicas y se investigará una mejora en las condiciones de deposición del material extruido.



Figura 7. a) Impresión 3D de un bowl cerámico utilizando la formulación C20 con 20% de caolín, b) impresión 3D de un recipiente utilizando la formulación C30 con 30% de caolín.

Los objetos fabricados demuestran que, al optimizar el proceso de manufactura (pasta cerámica + 3D), es posible construir geometrías tridimensionales y mejorar simultáneamente el acabado superficial. En particular, las geometrías curvas y complejas evidencian la capacidad de la impresión 3D en cerámica para generar formas intrincadas sin limitaciones de diseño. A pesar de que se identificaron irregularidades en las capas superiores e inferiores de las piezas impresas, se observó una alineación adecuada entre las capas, lo que indica que el proceso de impresión fue controlado de manera efectiva. Cabe destacar que las piezas impresas no requieren bases ni estructuras de soporte adicionales durante su fabricación.

4. Conclusiones

El presente estudio demuestra la viabilidad técnica de transformar una pasta comercial a base de resinas acrílicas (Ready-Mix) en un material apto para impresión 3D mediante la técnica de extrusión directa (DIW). La incorporación controlada de caolín, en proporciones de 10%, 20% y 30% en masa, junto con un contenido fijo de cemento (10%) y bórax (0.5%), modificó la reología del sistema favoreciendo la extrusión continua y la estabilidad geométrica durante la deposición capa por capa. Los ensayos de compresión evidenciaron un incremento significativo en la resistencia mecánica de las formulaciones con caolín respecto a la mezcla base, alcanzando valores de 6.5 MPa a los 35 días de curado para la formulación con 30% de caolín. Desde el punto de vista morfológico, las piezas impresas con mayor contenido de caolín (20% y 30%) mostraron una mejor definición de capas, menor

colapso estructural y mayor estabilidad dimensional, tanto en geometrías simples como en estructuras tridimensionales complejas. Como resultado práctico, se logró la impresión satisfactoria de un recipiente hueco tipo *bowl* con dimensiones aproximadas de 10 × 12 cm, el cual presentaba una textura superficial inducida por una distorsión radial controlada a lo largo del eje Z. En conjunto, la formulación con 20% de caolín representa un equilibrio óptimo entre viscosidad, cohesión interna y trabajabilidad.

La formulación de una pasta cerámica de bajo costo posiciona esta metodología como una alternativa accesible para la impresión 3D, haciéndola viable para su uso en instituciones educativas, laboratorios de investigación y en la manufactura artesanal.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud al Dr. Daniel Edén Ramírez Arreola por la propuesta de utilizar una pasta comercial como base para el desarrollo del proyecto. El primer autor expresa su gratitud a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SEICHTI), por el apoyo recibido para el desarrollo del trabajo de investigación a través de la beca de maestría (2023-000002-01NACF-00145).

Referencias

1. S. V. Murphy and A. Atala, "3D bioprinting of tissues and organs," *Nature Biotechnology*, vol. 32, no. 8, pp. 773–785, 2014. <https://doi.org/10.1038/nbt.2958>
2. N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286–1296, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
3. T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
4. W. Xu et al., "Toward automated construction: The design-to-printing workflow for a robotic in-situ 3D printed house," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, pp. e01442, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01442>
5. C. W. Hull, "Apparatus for Production of Three-Dimensional object by stereolithography," US Patent 4,575,330, Mar. 11, 1986. [Google Scholar]
6. R. Jones et al., "RepRap – the replicating rapid prototyper," *Robotica*, vol. 29, no. 1, pp. 177–191, 2011. <https://doi.org/10.1017/S026357471000069X>
7. S. F. Iftekar, A. Aabid, A. Amir, and M. Baig, "Advancements and limitations in 3D printing materials and technologies: A critical review," *Polymers*, vol. 15, no. 11, pp. 2519, 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15112519>
8. C. Schelly, G. Anzalone, B. Wijnen, and J. M. Pearce, "Open-source 3-D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom," *Journal of Visual Languages & Computing*, vol. 28, pp. 226–237, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2015.01.004>

9. J. Jauk, H. Vašatko, L. Gosch, K. Ristoski, J. Füssl, and M. Stavric, "Coextrusion of Clay-Based Composites: Using a Multi-Material Approach to Achieve Gradient Porosity in 3D-Printed Ceramics," *Ceramics*, vol. 6, no. 4, pp. 2243–2255, 2023. <https://doi.org/10.3390/ceramics6040136>
10. V. G. Rocha, E. Saiz, I. S. Tirichenko, and E. García-Tuñón, "Direct ink writing advances in multi-material structures for a sustainable future," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 8, no. 31, pp. 15646–15657, 2020. <https://doi.org/10.1039/D0TA04181E>
11. Z. Chen et al., "3D printing of ceramics: A review," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, no. 4, pp. 661–687, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
12. M. Z. Chaari, M. Abdelfatah, and C. Loreno, "A trial to convert a polymer FDM 3D printer to handle clay materials," *Springer Nature Applied Sciences*, vol. 4, no. 3, pp. 68, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-04937-w>
13. E. Romanczuk-Ruszk, B. Sztorch, D. Pakuła, E. Gabriel, K. Nowak, and R. E. Przekop, "3D printing ceramics-materials for direct extrusion process," *Ceramics*, vol. 6, no. 1, pp. 364–385, 2023. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010022>
14. C. F. Revelo and H. A. Colorado, "3D printing of kaolinite clay ceramics using the Direct Ink Writing (DIW) technique," *Ceramics International*, vol. 44, no. 5, pp. 5673–5682, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.219>
15. E. Ordoñez, J. M. Gallego, and H. A. Colorado, "3D printing via the direct ink writing technique of ceramic pastes from typical formulations used in traditional ceramics industry," *Applied Clay Science*, vol. 182, pp. 105285, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105285>
16. J. Alonso Madrid, G. Sotorrío Ortega, J. Gorostiza Carabaño, N. O. E. Olsson, and J. A. Tenorio Ríos, "3D claying: 3D printing and recycling clay," *Crystals*, vol. 13, no. 3, pp. 375, 2023. <https://doi.org/10.3390/cryst13030375>
17. Panel Rey, "Compuesto ready mix estándar plus." Accedido: Jul. 12, 2024. [Link]
18. Panel Rey, "Hoja de seguridad de materiales." Accedido: Jul. 12, 2024. [Link]
19. Panel Rey, "Product declaration." Accedido: Jul. 12, 2024. [Link]
20. I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. New York, NY: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
21. R. Hay, J. Li, and K. Celik, "Phase evolution, micromechanical properties, and morphology of calcium (alumino)silicate hydrates C-(A-)S-H under carbonation," *Cement and Concrete Research*, vol. 152, pp. 106683, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106683>

Comparación y Estudio del Desempeño de dos Sistemas Embebidos en FPGA

Abimael Jiménez¹, Gehová López-González², Omar Aguilar Loreto³

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. De Charro 450, Juárez, Chihuahua México

^{2,3}Departamento de Ingeniería, Universidad de Guadalajara, Av. Revolución 151, Autlán, Jalisco, México

Resumen: Los sistemas embebidos con FPGA (Field Programmable Gate Arrays) son utilizados en muchas aplicaciones en áreas de comunicaciones, automotriz, biomédica y aeroespacial debido a sus ventajas de reconfiguración de hardware y paralelismo. En este trabajo se presenta un análisis de desempeño de dos sistemas embebidos implementados en la tarjeta Basys 3, la cual contiene un FPGA Artix-7. En ambos sistemas se desarrolló el software, el cual integra una aplicación y controladores de los módulos de hardware. En la parte de hardware un diseño fue implementado con módulos de propiedad intelectual y otro con módulos desarrollados en lenguaje de descripción de hardware. Este último presentó el mejor desempeño al utilizar solo el 3.37% de los bloques lógicos disponibles del FPGA Artix-7 y un consumo de potencia de 0.106 W.

1. Introducción

En la actualidad, los sistemas embebidos en FPGA (Field Programmable Gate Arrays) representan una solución eficiente y flexible para aplicaciones que requieren procesamiento en tiempo real, bajo consumo de energía y personalización a nivel de hardware. Estas características proporcionan una solución intermedia entre los ASICs (Application-Specific Integrated Circuits) y los procesadores de propósito general.

Gracias a la integración de procesadores soft como Microblaze [1] y Nios V [2], implementados en HDL (Hardware Description Language), y procesadores físicos como ARM Cortex, desarrollado en nodos tecnológicos desde los 180 nm [3]; es posible el diseño de sistemas embebidos heterogéneos que combinan lógica programable con procesamiento convencional. Esta arquitectura híbrida ha impulsado su adopción en áreas como visión por computadora, robótica, comunicaciones y sistemas IoT (Internet of Things), donde la capacidad de paralelismo y la adaptabilidad de los FPGAs ofrecen ventajas significativas frente a plataformas tradicionales [4–7].

El diseño de un sistema embebido en FPGA implica el desarrollo de hardware y software. Respecto al hardware, las plataformas de diseño como Vivado [8] y Quartus [9] contienen diferentes módulos de propiedad intelectual (PI), algunos de uso gratuito y otros a través de licencias. La mayoría de los sistemas embebidos con

Primer Volumen

Recibido: mayo 12, 2025

Aceptado: mayo 24, 2025

autor de correspondencia:
abimael.jimenez@uacj.mx

© 2025 Revista Ciencia Aplicada

FPGA integran módulos de PI, simplificación de la etapa diseño. Por otro lado, es posible desarrollar sistemas embebidos sin utilizar módulos de PI. Sin embargo, esto implica un conocimiento avanzado de HDLs como VHDL [10] y Verilog [11]. Por otra parte, el software del sistema embebido se puede implementar en RiscFree IDE y Vitis para FPGAs de Intel y AMD, respectivamente [12,13].

En este trabajo se presenta un estudio del desempeño de sistemas embebidos en FPGA a través del diseño de dos sistemas embebidos mínimos, el primero se diseñó con módulos PI de AMD y en el segundo utiliza módulos de hardware en VHDL. Ambos sistemas embebidos fueron evaluados utilizando la misma aplicación de software y se implementaron en el mismo FPGA.

2. Metodología

Los sistemas embebidos analizados en este trabajo se diseñaron con las herramientas de diseño Vivado Desing Suit y Vitis 2020.2 para el desarrollo de hardware y software, respectivamente [8]. Los dos sistemas se implementaron en la tarjeta de desarrollo Basys 3 de Digilent, la cual contiene el FPGA Artix-7 de AMD [14]. Ambos sistemas utilizaron los módulos de hardware del procesador soft Microblaze, el módulo UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) y el módulo GPIO (General Purpose Input/Output). Finalmente, en ambos sistemas se implementaron los drivers correspondientes para cada módulo o periférico y se ejecutó la misma aplicación de software. La única diferencia radica en que el sistema *system-ip* utilizó módulos de PI de AMD y el sistema *system-hdl* utilizó módulos de hardware desarrollados en VHDL.

2.1 Diseño de hardware

El diseño *system-ip* se integró con los módulos PI del procesador soft Microblaze, el módulo AXI-UART (Advanced eXtensible Interface - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) y el módulo GPIO como se observa en las Figuras 1 y 2. También se observa que en el diseño aparecen más módulos de hardware, los cuales son agregados automáticamente por la herramienta de Vivado al realizar la automatización de interconexión.

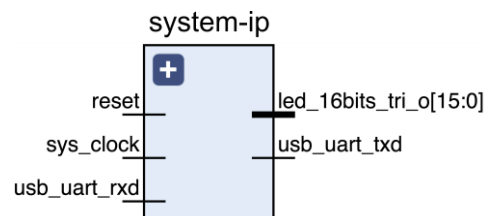


Figura 1. Módulo principal del sistema embebido *system-ip* implementado en Vivado.

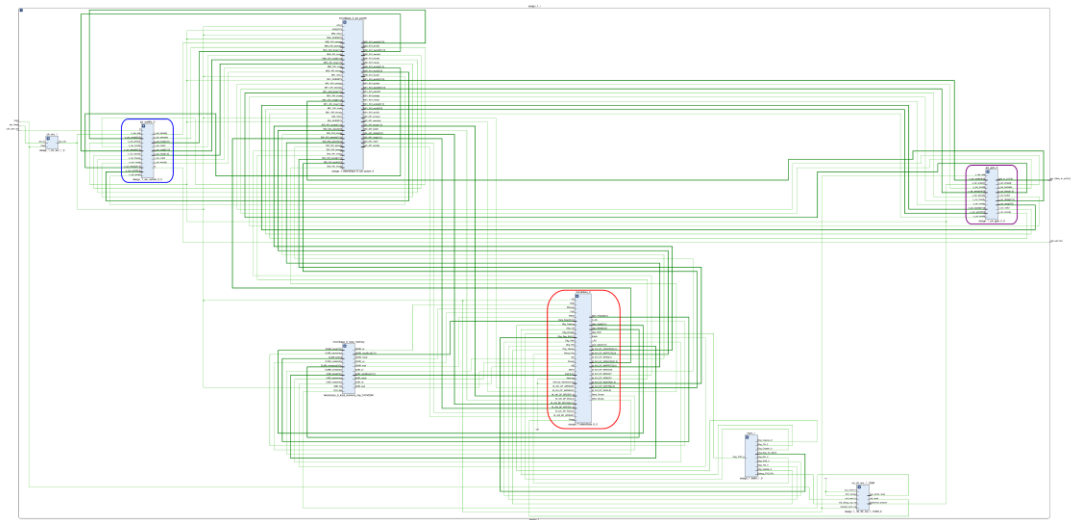


Figura 2. Arquitectura de system-ip en Vivado con los módulos UART, Microblaze y GPIO en recuadros azul, rojo y morado, respectivamente.

En las Figuras 3 y 4 se muestra la arquitectura del diseño *system-hdl*. Este sistema se implementó con el procesador soft Microblaze (CPU en recuadro rojo de la Figura 3), y los módulos UART, GPO, y GPI como se muestra en los recuadros azul, rojo y morado de la Figura 4, respectivamente. Se observa que en este diseño los módulos GPO y GPI están separados en dos módulos en vez de un solo módulo GPIO. Todos los módulos del diseño *system-hdl*, a excepción del procesador, están desarrollados en VHDL y se tomaron del sistema Vanilla [14]. En ambos sistemas el procesador Microblaze se configuró con 128 kb de memoria RAM y una frecuencia de reloj de 100 MHz.

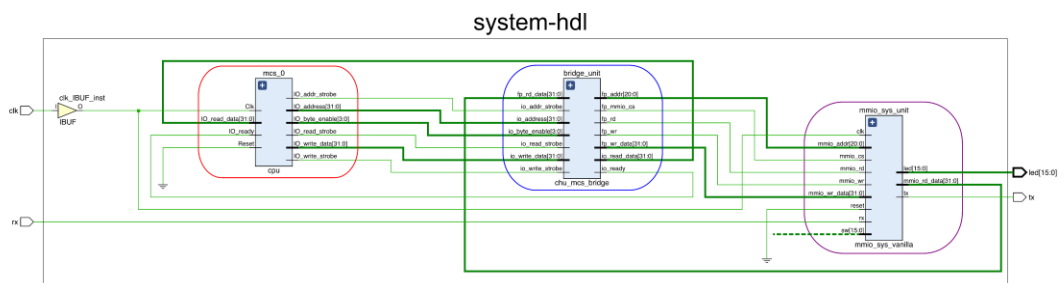


Figura 3. Módulo principal del sistema embebido system-hdl con los módulos chu_mcs_bridge, cpu (Microblaze) y mmio_sys_vanilla en recuadros azul, rojo y morado, respectivamente.

Después de agregar las fuentes de los módulos de hardware de cada sistema y su respectivo archivo de distribución de pines de la tarjeta Basys 3, se realizó el proceso de síntesis y generación del archivo .bit (bitstream) para programar el hardware en el FPGA Artix-7. Finalmente, se exportó el hardware de ambos sistemas, archivo .xsa (Xilinx Support Archive) que describe la plataforma de hardware.

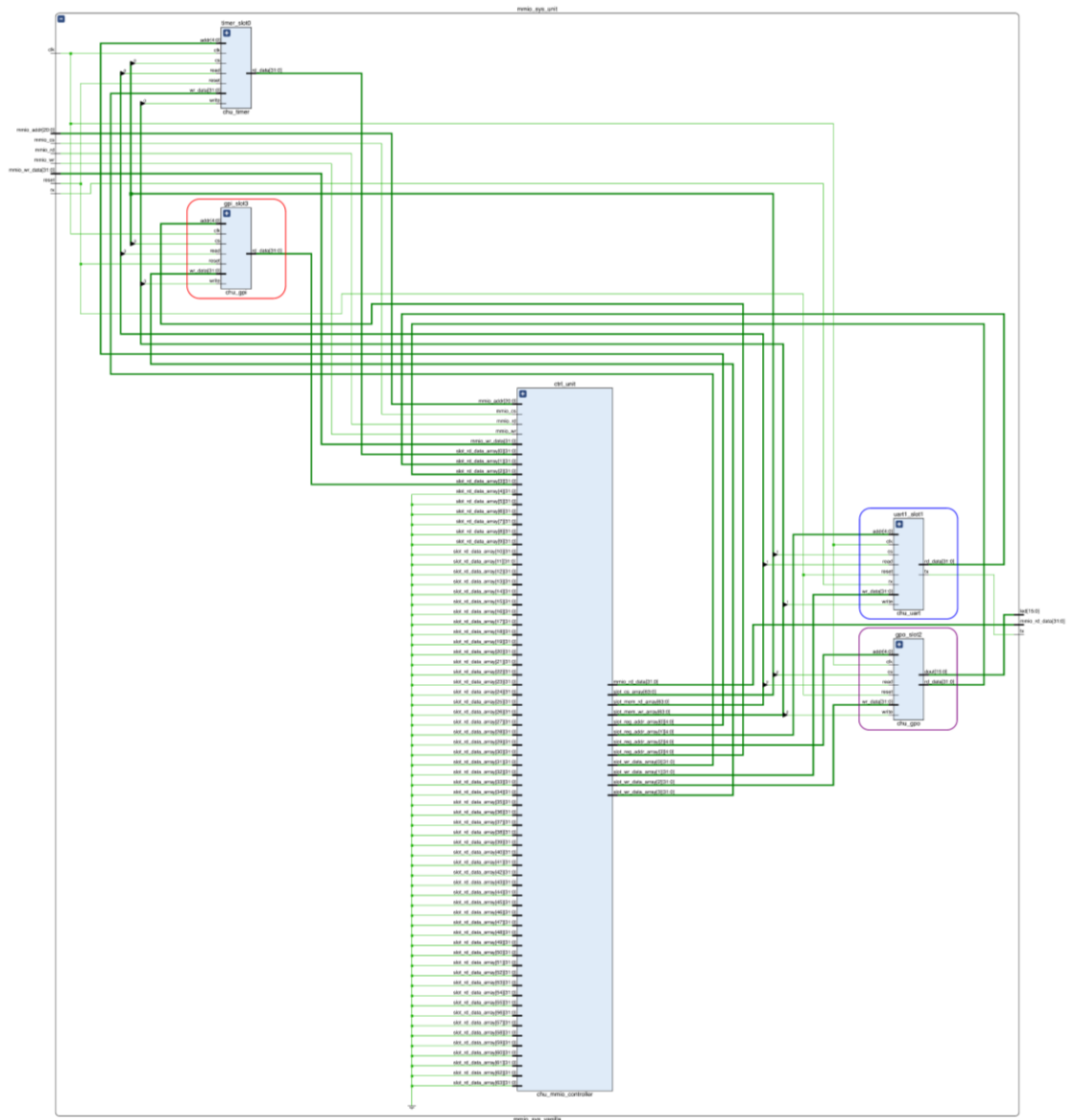


Figura 4. Arquitectura de system-hdl con los módulos UART, GPI y GPO en recuadros azul, rojo y morado, respectivamente.

2.2 Diseño de software

El diseño de software se realizó de acuerdo con el diagrama de flujo de la Figura 5a. El primer paso fue la creación de un espacio de trabajo en Vitis. Posteriormente, se creó la plataforma, importando la plataforma de hardware (archivo .xsa) que se exportó en Vivado; la cual es una combinación de componentes de hardware y componentes de software (dominios/Board Support Package (BSP), etc.). A continuación, se generó el BSP, que proporciona el soporte básico para la plataforma

de hardware, facilitando la inicialización del sistema al encenderse y permitiendo la ejecución del programa de aplicación.

En ambos sistemas se empleó un BSP tipo autónomo que ofrece una capa de software sencilla y de bajo nivel. Esta configuración brinda acceso directo a las funciones básicas del procesador sin necesidad de un sistema operativo, como se observa en la Figura 5a.

Después, se implementaron los controladores para los módulos de hardware UART, GPO y GPI como se observa en la Figura 5b. En el diseño system-ip, estos controladores se desarrollaron a partir de las bibliotecas disponibles para cada módulo de PI. En cambio, en el diseño system-hdl, se utilizaron los controladores desarrollados en el sistema Vanilla [14].

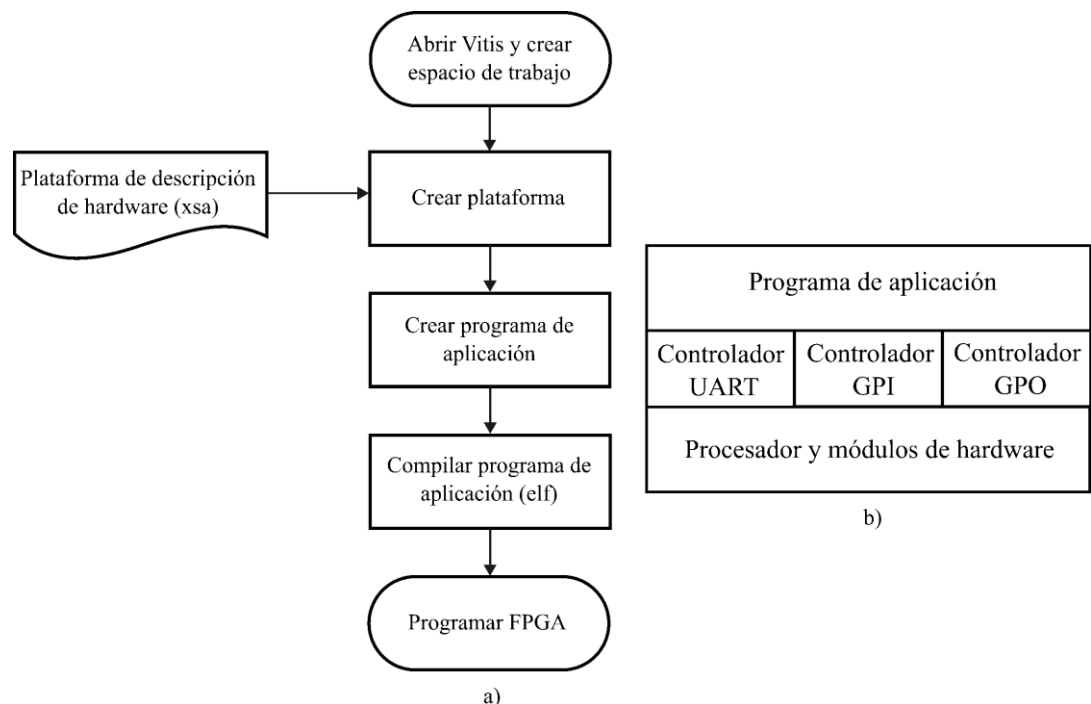


Figura 5. a) Diagrama de flujo para desarrollar el software de los diseños. b) Capas que integran el software.

Posteriormente, se desarrolló el programa de aplicación en C++ que contiene un ciclo infinito con el que inicia el sistema, interactuando con cada módulo de hardware y el procesador. Las rutinas que incluye la aplicación son el parpadeo de todos los LEDs cinco veces cada segundo, el encendido de los LEDs uno por uno cada segundo y el envío de mensajes a través de UART. Tras ello, el software se compiló en Vitis, generando el archivo ejecutable (.elf), el cual se carga en la memoria RAM del procesador MicroBlaze de ambos diseños. Esta carga se realizó desde Vivado, asociando el archivo (.elf) con la arquitectura de hardware correspondiente.

Finalmente, se regeneró el bitstream en Vivado, integrando tanto el hardware como el software, para programar el FPGA Artix-7 como se observa en la Figura 5a. Para verificar el correcto funcionamiento de ambos sistemas, se utilizó una conexión serial mediante la herramienta PuTTY, lo que permitió visualizar mensajes, así como depurar y optimizar el software.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la implementación de ambos diseños y se realiza un análisis comparativo del desempeño y los recursos utilizados.

En la Figura 6 se puede observar que el diseño system-ip utiliza la mayor cantidad de recursos. El diseño utilizó 6.96 % de los CLBs (Configurable Logic Blocks) disponibles en el FPGA Artix 7 donde la mayoría de los elementos fueron LUTs (Look-Up Tables); y principalmente, se utilizaron para el diseño de circuitos lógicos con un 6.38 % y solo el 1.44 % de las LUTs se utilizó como memoria. Por su parte el diseño system-hdl utiliza la menor cantidad de recursos, a excepción de los bloques IOB (Input/Output Block) y multiplexores. Esto se debe a que el sistema Vanilla [14] está preconfigurado para integrar hasta 64 módulos de hardware como se observa en la Figura 4. En los registros de estos módulos, el procesador puede escribir y leer datos a través de un decodificar 6 a 64 y un multiplexor 64 a 1, respectivamente.

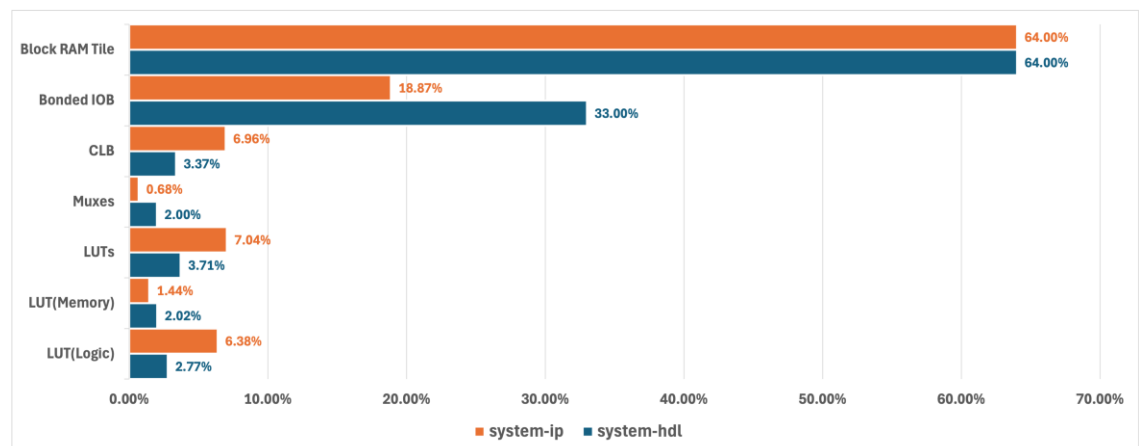


Figura 6. Comparación de los recursos de hardware utilizados en los diseños system-ip y system hdl.

En la Figura 7 se muestra el consumo de potencia de ambos sistemas. El consumo de potencia total de cada diseño está definido por

$$P = P_{static} + P_{dynamic} \quad (1)$$

donde P_{static} representa el consumo de potencia estática y $P_{dynamic}$ es la potencia dinámica. Las dos contribuciones más importantes de la potencia estática son la potencia consumida cuando los transistores están completamente apagados o

encendidos y la debida a corrientes de fuga. La potencia dinámica tiene tres contribuciones importantes, la frecuencia del sistema, la capacitancia de carga y el voltaje de alimentación; por lo tanto, está relacionada con la velocidad de conmutación (encendido / apagado) de los transistores.

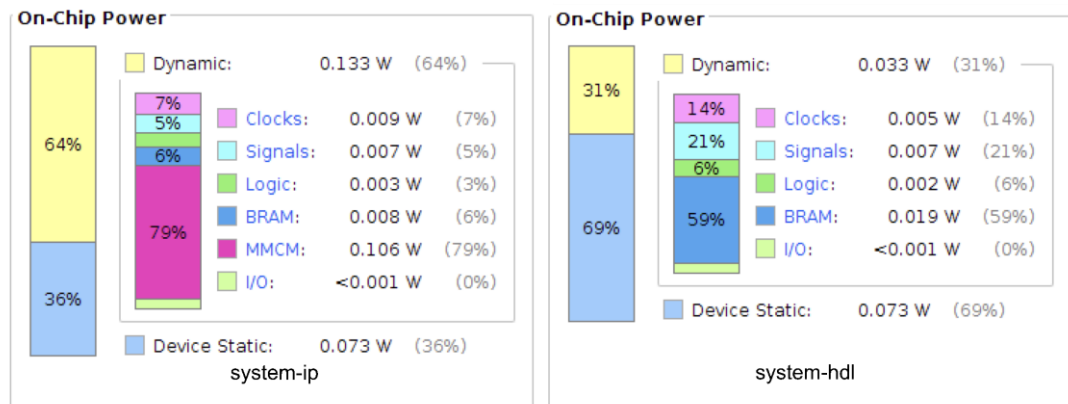


Figura 7. Comparación del consumo de potencia en los diseños system-ip y system hdl.

En la Figura 7 se observa que el consumo de potencia total para el diseño system-ip fue de 0.206 W; mientras que, para el diseño system-hdl fue de 0.106 W. También se observa que el consumo de potencia dinámica es mayor en el diseño system-ip con 0.133 W contra solo 0.033 W en el diseño system-hdl. El 79 % de la potencia dinámica del diseño system-ip se consume en el módulo MMCM (Mixed-Mode Clock Manager). Este módulo es una fuente de señales de reloj para FPGAs y sistemas embebidos de AMD que se utiliza para generar múltiples señales de reloj con varias relaciones de frecuencia y fase a partir de una sola señal de reloj de entrada. Este módulo es principalmente utilizado por el protocolo AXI (Advanced eXtensible Interface).

4. Conclusiones

Los diseños system-ip y system-hdl se desarrollaron satisfactoriamente. El diseño system-hdl utilizó la menor cantidad de recursos de un FPGA Artix-7 y el menor consumo de potencia. Esto plantea la posibilidad de desarrollar sistemas embebidos más complejos en FPGAs más económicos y pequeños; utilizando módulos de hardware en VHDL en lugar de módulos de PI de AMD. Como trabajo a futuro se continuarán agregando módulos de hardware a estos sistemas con la finalidad de determinar si esta tendencia se mantiene o cambia al tener sistemas embebidos más grandes y con mayores requerimientos.

Referencias

1. "AMD MicroBlaze™ Processor", AMD, Accedido: Abr. 25, 2025. [\[Link\]](#)
2. "Nios® V Processor", Intel, Accedido: Abr. 25, 2025. [\[Link\]](#)
3. "Bringing the benefits of Cortex-M processors to FPGA", AMD, Accedido: Abr. 25, 2025. [\[Link\]](#)

4. Magwervyari A and Chen Y., "Review of State-of-the-Art FPGA Applications in IoT Networks". *Sensors*, vol. 22, no. 19, pp. 7496, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22197496>
5. Khan MI and da Silva B., "Harnessing FPGA technology for energy-efficient wearable medical devices". *Electronics*. Vol. 13, no. 20, pp. 4094, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13204094>
6. Su, X. and Zuo, G., "Computer Artificial Vision Image Processing System Based on FPGA", en International Conference on Cognitive based Information Processing and Applications (CIPA 2021), J. Jansen, B., Liang, H., Ye, J., Eds., Springer, Singapore, cap. 85. pp. 194-201, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5854-9_24
7. Machado, F., Nieto, R., Fernández-Conde, J., Lobato, D. and José M. Cañas, "Vision-based robotics using open FPGAs", *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 103, pp. 104974, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104974>
8. "AMD Vivado™ Design Suite", AMD, Accedido: Abr. 25, 2025. [\[Link\]](#)
9. "Software de diseño Quartus® Prime", Intel, Accedido: Abr. 25, 2025. [\[Link\]](#)
10. "IEEE Standard for VHDL Language Reference Manual", *IEEE*, pp. 1-673, 2019. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8938196>
11. IEEE Standard for Verilog Hardware Description Language, *IEEE*, pp. 1-590, 2006. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.99495>
12. "Nios® V Embedded Processor Design Handbook", Intel, Accedido Mayo 16, 2025. [\[Link\]](#)
13. "Plataforma de software unificada AMD Vitis", AMD, Accedido Mayo 16, 2025. [\[Link\]](#)
14. "FPGA AMD Artix™ 7", AMD, Accedido Mayo 16, 2025. [\[Link\]](#)
15. P. Chu, *FPGA Prototyping by VHDL Examples: Xilinx MicroBlaze MCS SoC*, 2ed, Wiley, 2017.

Materiales adsorbentes alternativos para la remoción de contaminantes en agua

Gabriela Peña Velasco

Departamento de Farmacobiología, CUCEI, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, Guadalajara, Jalisco, México.

Resumen: Se estima que el consumo de agua a nivel mundial se duplicará para el año 2050, por lo que la remoción de contaminantes en los compartimentos acuáticos se convierte en una estrategia a corto plazo para contrarrestar los problemas derivados de las sequías y la escasez de agua. Este trabajo aborda factores críticos, perspectivas y limitaciones de un compuesto organometálico a base de hierro en el tratamiento de aguas residuales. El material propuesto fue Fe-MIL-101, obtenido mediante una síntesis asistida por microondas, que redujo el tiempo de síntesis hasta siete veces en comparación con otros adsorbentes. Las propiedades texturales del adsorbente sintetizado se analizaron mediante adsorción-desorción de N₂, lo que permitió una mejor comprensión de los posibles mecanismos sinérgicos de adsorción que mejoran su capacidad para remover contaminantes. Finalmente, se evaluaron las eficiencias de remoción y la reutilización de Fe-MIL-101, mostrando un desempeño prometedor para la remoción de contaminantes emergentes en agua.

1. Introducción

El agua es un recurso natural indispensable para la vida humana y el sustento del medio ambiente, que, como consecuencia de un acelerado crecimiento poblacional e industrializado, ha sufrido un preocupante deterioro. El uso inadecuado de este recurso ha dado lugar a una crisis hídrica, que consiste en una demanda de agua potable mayor a la disponible.

Actualmente la aparición sistemática de contaminantes emergentes (CEs) en agua se ha convertido en una de las líneas prioritarias de investigación a nivel mundial. Estos contaminantes se han detectado en diversos compartimentos ambientales [1-3] asociando a las aguas residuales como una posible fuente de introducción de CEs al medio ambiente. Sin embargo, hoy en día, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que alrededor del 80% de las aguas residuales se vierten en ríos y lagos con un tratamiento parcial, y que al menos el 10% de la población mundial consume alimentos regados con aguas residuales sin tratar [4].

En este contexto, la literatura sugiere que la eliminación de contaminantes del agua residual puede contribuir a un aumento de recursos hídricos facilitando su reutilización y promoviendo la preservación de las fuentes de agua dulce. Además

Recibido: mayo 27, 2025

Aceptado: junio 15, 2025

autor de correspondencia:
gabriela.pvelasco@academicos.udg.mx

© 2025 Revista Ciencia Aplicada

de representar una ventaja económica en comparación a recursos obtenidos mediante desalinización [5].

Existen múltiples métodos (físicos, químicos y biológicos) para el tratamiento de agua; no obstante, persiste el debate sobre las estrategias más sostenibles para su gestión. Es así como la adsorción continúa liderando las investigaciones debido a su bajo costo, operación a temperatura ambiente, tecnología escalable [6] y capacidad de remover mezclas de residuos de CE's del entorno acuático [7].

Una clase de compuestos organometálicos identificados como MOFs (por sus siglas en inglés metal-organic frameworks) han sido considerados en las últimas décadas como materiales adsorbentes superiores [8]. Esto se debe principalmente a su estructura nanoporosa tridimensional (3D), que proporciona una superficie altamente porosa, con elevada estabilidad química y térmica, así como mayores capacidades de adsorción en diversas condiciones en comparación con los adsorbentes convencionales [9]. Por lo tanto, se han estudiado rigurosamente para posibles aplicaciones de remediación ambiental.

Sin embargo, actualmente existen miles de familias de MOFs, por lo que se debe realizar una evaluación cuidadosa para seleccionar la más adecuada para el tratamiento de aguas residuales. Específicamente, los factores a considerar para dicha aplicación incluyen su estabilidad en agua y sus propiedades texturales, que en conjunto favorezcan una interacción con el contaminante.

En su investigación Joseph et al. [10] identificaron que las MOFs a base de hierro se encuentran entre las soluciones más prometedoras para superar las limitaciones de las tecnologías convencionales, gracias a su baja toxicidad, alta estabilidad acuosa y abundantes sitios activos en su superficie, lo que facilita la interacción con compuestos de diverso origen.

Este trabajo se centra en la síntesis del MOF Fe-MIL-101, su caracterización textural y su aplicación en pruebas preliminares para la remoción de pesticidas presentes en agua.

Desde una perspectiva de sustentabilidad ambiental, el estudio proporciona información relevante sobre un material adsorbente alternativo, ambientalmente seguro y económicamente viable, que puede contribuir a la implementación de estrategias de bajo costo para su aplicación en la eliminación de CE's peligrosos en ambientes acuáticos reales.

2. Metodología

2.1 Síntesis de Fe-MIL-101

En las últimas décadas ha surgido el concepto de “Fast Chemistry” (Química Rápida) cuyo objetivo principal es la reducción del tiempo de las reacciones químicas. En este contexto, y con el fin de desarrollar alternativas eficientes, rápidas, económicas y de menor impacto ambiental para la obtención de materiales adsorbentes, se implementó una síntesis asistida por microondas [11]. La cual de manera muy general consiste en la mezcla homogénea de los reactivos precursores disueltos en solventes para posteriormente ser sometidos a calentamiento mediante radiación microondas.

La síntesis de Fe-MIL-101 consistió en disolver en 42 mL de dimetilformamida (DMF), cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y ácido tereftálico, en una proporción molar (1:1). La mezcla se agitó durante 10 min, añadiendo posteriormente 1 mL de ácido acético, y se continuó la agitación a temperatura ambiente por 30 min. En la segunda etapa, la solución se distribuyó en 6 tubos de teflón especializados para radiación microondas, en volúmenes iguales, y se sometieron a una temperatura de 150°C por 30 min en un equipo CEM Mars 6 Microwave. Tras el enfriamiento a temperatura ambiente, se procedió a una etapa de purificación del material mediante lavados sucesivos con DMF, metanol y agua, con movimientos vibratorios en un agitador múltiple Vortex durante 2 min por lavado con centrifugación intermedia para eliminar residuos de solventes y reactivos sin reaccionar. Finalmente, el sólido recuperado se secó a 85°C por 12 h (ver Figura 1).



Figura 1. Esquema general de la síntesis asistida por microondas del Fe-MIL-101.

2.2 Caracterización de Propiedades Texturales

En el estudio de materiales, las técnicas de caracterización permiten conocer a fondo sus propiedades fisicoquímicas. Para las MOFs utilizadas como adsorbentes, es fundamental determinar su porosidad y área superficial, entendida esta última como la superficie exterior total de un material expuesta al ambiente; la cual influye directamente en la reactividad e interacción con otras sustancias [12].

En este trabajo se utilizó la técnica de fisisorción de nitrógeno, basada en la adhesión física de moléculas de nitrógeno en la superficie del material adsorbente. Para ello se empleó un equipo ASAP 20 de Micromeritics Instrument Corporation.

El material fue previamente desgasificado a 100°C durante 12 h, y las mediciones de adsorción se realizaron a -196°C.

2.3 Experimentos Preliminares para Remoción de Contaminantes en Agua

Los estudios preliminares de adsorción de contaminantes se realizan mediante experimentos por lotes (*batch adsorption*), los cuales consisten en añadir una cantidad conocida del material adsorbente a una solución que contiene una concentración conocida del contaminante. Enseguida se somete a agitación controlada y se mide la concentración del contaminante a lo largo del tiempo, con el fin de estudiar el equilibrio y la cinética de adsorción.

Para evaluar el desempeño de Fe-MIL-101 como material adsorbente, se estudió la remoción simultánea en agua de dos pesticidas: glifosato (GLY) y su metabolito ácido aminometilfosfónico (AMPA). Brevemente, se añadieron 0,05 g de Fe-MIL-101 a 15 mL de solución de GLY y AMPA a una concentración de 2 mg/L. La solución se agitó 150 rpm durante 30 min en un agitador orbital digital a temperatura ambiente (298 K). Se tomaron alícuotas de 1 mL al inicio y al final de la adsorción, y se analizaron mediante cromatografía líquida de alta resolución acoplada a espectrometría de masas (HPLC-MS/MS) de Agilent Technology.

3. Resultados Experimentales

3.1 Comparación del proceso de síntesis de Fe-MIL-101 con otros materiales adsorbentes

En el tratamiento del agua, uno de los principales desafíos asociados a los procesos de adsorción es desarrollar materiales adsorbentes mediante síntesis que sean sostenibles, rentables y menos invasivas [13]. La Tabla 1 resume la duración de las síntesis para distintos materiales adsorbentes reportados previamente. Como puede observarse, la mayoría de ellos requiere tiempos de síntesis superiores a 16 h, debido a la implementación de estrategias de modificación en los materiales que buscan mejorar la especificidad y acelerar la tasa de adsorción de contaminantes [14]. Sin embargo, estas modificaciones rara vez consideran el impacto ambiental asociado a su producción a gran escala.

En contraste, el proceso de síntesis de Fe-MIL-101 desarrollado en este trabajo tomó tan solo 0,5 h, y al considerar también el tiempo de secado (8 horas), el proceso completo representa una alternativa significativamente más eficiente. Adicionalmente, la metodología asistida por microondas empleada favorece la reproducibilidad y estandarización del procedimiento, facilitando su escalado industrial [15].

Tabla 1. Comparación de los tiempos de síntesis para obtención de materiales adsorbentes.

Adsorbente	Tiempo de síntesis*	Aplicación	Ref
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ @UiO-67	~ 28 h	Remoción de glifosato	[16]
MIL-101(Fe)/SCB	32 h	Adsorción de glifosato	[17]
Polímeros magnéticos con impresión molecular	~ 62 h	Adsorción de pesticidas	[18]
RED-Fe-NH ₂ -SBA-15	~ 31 h	Remoción de glifosato	[19]
Carbón microporoso funcionalizado	~ 16 h	Adsorción de flumequina	[20]
Carbón activado derivado de huesos de durazno	~ 35 h	Adsorción de pesticidas	[21]
MOFs@MPCA aerogel	24 h	Adsorción de pesticidas	[22]
Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ /MIL-101(Cr)	46 h	Adsorción de pesticidas	[23]
Fe-MIL-101	8.5 h	Adsorción de glifosato y AMPA	<i>Este trabajo</i>

*El tiempo de secado está incluido en el tiempo de síntesis.

3.2 Propiedades Texturales de Fe-MIL-101

Además de contar con un proceso de síntesis eficiente y reproducible, se busca que los materiales adsorbentes para prácticas ambientales sean capaces de remover simultáneamente una mezcla de contaminantes presentes en matrices acuosas [24]. En este sentido, las MOFs presentan ventajas notables, ya que su estructura tridimensional y sus componentes metálicos favorecen múltiples mecanismos de interacción con los contaminantes.

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos del análisis de fisisorción de N₂ para el Fe-MIL-101 sintetizado. En el gráfico 2a) se observa la isoterma de adsorción-desorción de N₂ clasificada como Tipo I según la IUPAC [25], lo cual indica la presencia de una estructura microporosa (diámetros de poros < 2 nm). Esta clasificación se confirmó mediante el análisis de la distribución de tamaño poro mostrado en el gráfico 2b), donde se aprecia una distribución de poros entre 1 y 30 nm, con la mayor concentración alrededor de 1.7 nm. El área superficial de Fe-MIL-101 calculada por el método BET (Brunauer–Emmett–Teller) fue de 204 m²/g.

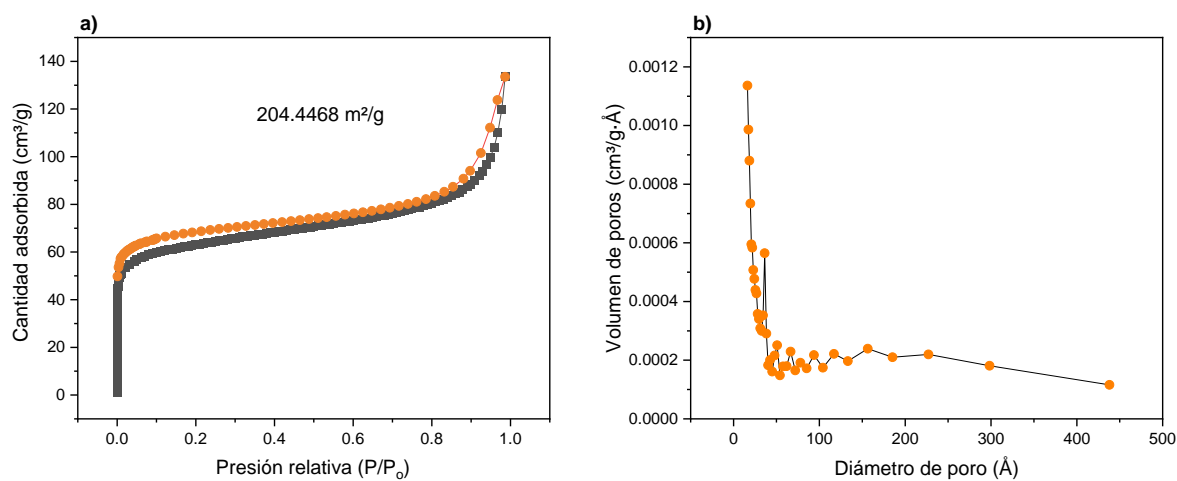


Figura 2. (a) Isothermas de adsorción-desorción de N₂ y (b) Distribución del tamaño de poro de Fe-MIL-101.

3.3 Adsorción de pesticidas usando Fe-MIL-101

Para descartar problemas de reproducibilidad en la síntesis del Fe-MIL-101 que pudieran impactar en su aplicación como material adsorbente, para los experimentos de adsorción se emplearon tres lotes independientes, sintetizados en diferentes fechas. Asimismo, con el fin de evaluar la viabilidad de reutilización del material, se llevaron a cabo ciclos consecutivos de adsorción, recuperando el Fe-MIL-101 mediante centrifugación, seguido de tres lavados con agua desionizada y secado por 8 h, antes de su reuso.

La Figura 3a-b presenta los resultados de los experimentos de adsorción y la prueba de reuso de Fe-MIL-101 en la adsorción simultánea de GLY y AMPA, respectivamente. Se alcanzaron eficiencias de adsorción entre 90.8 – 97.3% para GLY y entre 54.8 – 68.6% para AMPA después de 30 min de contacto con Fe-MIL-101. Con respecto a la reutilización de Fe-MIL-101, se observó una ligera disminución en la eficiencia de remoción tras tres ciclos, pasando del 97 al 92% para GLY, y del 69 al 51% para AMPA. Para aplicaciones a gran escala, la reutilización de los adsorbentes es una de las características más significativas en la remoción de contaminantes.

Estos resultados preliminares demuestran la capacidad funcional y reutilizable del Fe-MIL-101 para su empleo en la remoción de contaminantes en agua y su potencial como alternativa viable para aplicaciones a mayor escala.

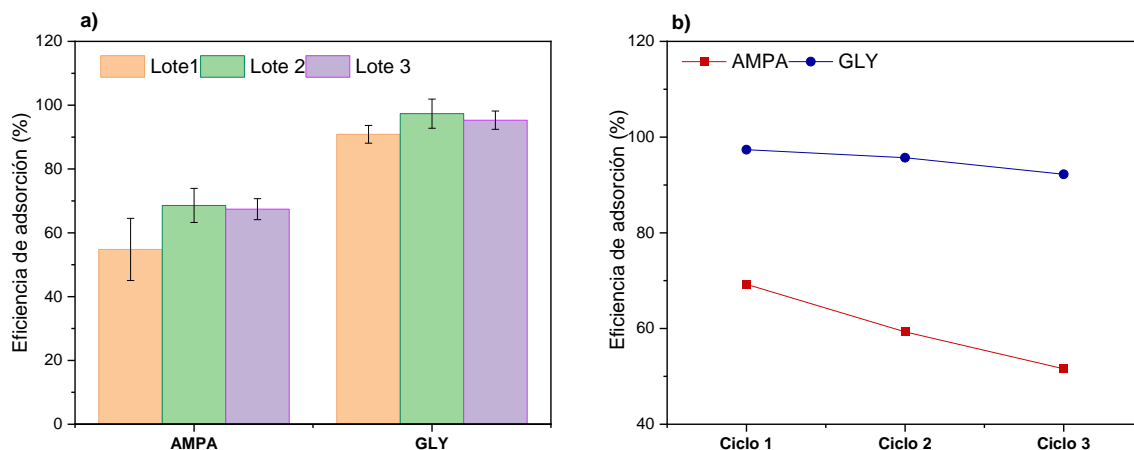


Figura 3. (a) Experimentos de adsorción de GLY-AMPA a 2 mg/L después de 0,5 h utilizando 0,05 g de Fe-MIL-101 a temperatura ambiente. (b) Prueba de reutilización de Fe-MIL-101.

6. Conclusiones

Se requiere una investigación mucho más amplia para determinar si el tratamiento de agua (superficial y residual) mediante MOFs basados en hierro puede representar una alternativa menos invasiva para la preservación de los recursos hídricos. Los hallazgos de este estudio preliminar demostraron que, mediante síntesis asistida por microondas, se obtuvo Fe-MIL-101 en un tiempo total de 8.5 h. Asimismo, se comprobó una eficiencia de remoción superior al 98% para glifosato y del 70% para su metabolito AMPA.

Además, se evidenció la posibilidad de reutilización del material hasta por tres ciclos, sin una disminución significativa de las eficiencias de remoción de los contaminantes seleccionados.

Para avanzar en la aplicación práctica de este tipo de materiales, son necesarios enfoques interdisciplinarios en el tratamiento de agua, que contemplen la incorporación de MOFs. Si bien la evaluación del flujo, el soporte, la capacidad de adsorción y la reutilización del Fe-MIL-101 han sido evaluados a detalle en condiciones de laboratorio, una limitación significativa de la investigación global sigue siendo la ausencia de estudios en ambientes acuáticos reales.

Agradecimientos

G. Peña agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo recibido para el desarrollo del trabajo de investigación a través de la beca de estancia posdoctoral (EPM 2023, CVU 588460).

Referencias

1. J. M. Galindo-Miranda, C. Guízar-González, E. J. Becerril-Bravo, G. Moeller-Chávez, E. León-Becerril, and R. Vallejo-Rodríguez, "Occurrence of emerging contaminants in environmental surface waters and their analytical methodology - A review," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 19, no. 7, pp. 1871–1884, 2019. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.087>
2. I. Vázquez-Tapia *et al.*, "Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review," *Chemosphere*, vol. 308, pp. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>
3. C. Peña-Guzmán *et al.*, "Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature," *J. Environ. Manage.*, vol. 237, pp. 408–423, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
4. P. Drechsel, M. Qadir, and D. Galibourg, "The WHO Guidelines for Safe Wastewater Use in Agriculture: A Review of Implementation Challenges and Possible Solutions in the Global South," *Water*, vol. 14, no. 6, pp. 1-20, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14060864>
5. A. Jodar-Abellan, M. I. López-Ortiz, and J. Melgarejo-Moreno, "Wastewater treatment and water reuse in Spain. Current situation and perspectives," *Water*, vol. 11, no. 8, pp. 17–22, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11081551>
6. T. Rasheed *et al.*, "Environmental threatening concern and efficient removal of pharmaceutically active compounds using metal-organic frameworks as adsorbents," *Environ. Res.*, vol. 185, p. 109436, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109436>
7. S. S. Kaushal *et al.*, "Watershed 'chemical cocktails': forming novel elemental combinations in Anthropocene fresh waters," *Biogeochemistry*, vol. 141, no. 3, pp. 281–305, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0502-6>
8. H. Kaur, N. Devi, S. S. Siwal, W. F. Alsanie, M. K. Thakur, and V. K. Thakur, "Metal-Organic Framework-Based Materials for Wastewater Treatment: Superior Adsorbent Materials for the Removal of Hazardous Pollutants," *ACS Omega*, vol. 8, no. 10, pp. 9004–9030, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07719>
9. M. Ding, X. Cai, and H. L. Jiang, "Improving MOF stability: Approaches and applications," *Chem. Sci.*, vol. 10, no. 44, pp. 10209–10230, 2019. <https://doi.org/10.1039/c9sc03916c>
10. J. Joseph, S. Iftkhar, V. Srivastava, Z. Fallah, E. N. Zare, and M. Sillanpää, "Iron-based metal-organic framework: Synthesis, structure and current technologies for water reclamation with deep insight into framework integrity," *Chemosphere*, vol. 284, pp. 1-35, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131171>
11. J. Prado-Jongal and E. Morán, "Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos," Real Sociedad Española de Química, *An. Química*, vol. 107, no. 2, pp. 129-136, 2011.
12. M. Nasrollahzadeh, "Biopolymer-based metal nanoparticle chemistry for sustainable applications," India, Elsevier Inc., 2021.
13. K. Boukayouht, L. Bazzi, and S. El Hankari, "Sustainable synthesis of metal-organic frameworks and their derived materials from organic and inorganic wastes," *Coord. Chem. Rev.*, vol. 478, p. 214986, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214986>
14. M. Du *et al.*, "Insight into the synthesis and adsorption mechanism of adsorbents for efficient phosphate removal: Exploration from synthesis to modification," *Chem. Eng. J.*, vol. 442, p. 136147, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.136147>

15. R. S. Forgan, "Reproducibility in research into metal-organic frameworks in nanomedicine," *Commun. Mater.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–5, 2024. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00475-7>
16. Q. Yang *et al.*, "The simultaneous detection and removal of organophosphorus pesticides by a novel Zr-MOF based smart adsorbent," *J. Mater. Chem. A*, vol. 6, no. 5, pp. 2184–2192, 2018. <https://doi.org/10.1039/c7ta08399h>
17. R. yi Zhou, J. xia Yu, and R. an Chi, "Selective removal of phosphate from aqueous solution by MIL-101(Fe)/bagasse composite prepared through bagasse size control," *Environ. Res.*, vol. 188, no. 693, pp. 1–10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109817>
18. A. Masoumi, K. Hemmati, and M. Ghaemy, "Recognition and selective adsorption of pesticides by superparamagnetic molecularly imprinted polymer nanospheres," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 55, pp. 49401–49410, 2016. <https://doi.org/10.1039/c6ra05873f>
19. S. Fiorilli *et al.*, "Iron oxide inside SBA-15 modified with amino groups as reusable adsorbent for highly efficient removal of glyphosate from water," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 411, pp. 457–465, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.206>
20. Z. Zhao, B. Liang, M. Wang, Q. Yang, M. Su, and S. Liang, "Microporous carbon derived from hydroxyl functionalized organic network for efficient adsorption of flumequine: Adsorption mechanism and application potentials," *Chem. Eng. J.*, vol. 427, p. 130943, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130943>
21. S. Harabi *et al.*, "Adsorption of Pesticides on Activated Carbons from Peach Stones," *Processes*, vol. 12, no. 1, p. 238, 2024. <https://doi.org/10.3390/pr12010238>
22. W. Liang, B. Wang, J. Cheng, D. Xiao, Z. Xie, and J. Zhao, "3D, eco-friendly metal-organic frameworks@carbon nanotube aerogels composite materials for removal of pesticides in water," *J. Hazard. Mater.*, vol. 401, p. 123718, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123718>
23. J. Ma *et al.*, "Metal organic frameworks (MOFs) for magnetic solid-phase extraction of pyrazole/pyrrole pesticides in environmental water samples followed by HPLC-DAD determination," *Talanta*, vol. 161, pp. 686–692, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.09.035>
24. O. Solcova, M. Dlaskova, and F. Kastanek, "Innovative Sorbents for the Removal of Micropollutants from Water," *Molecules*, 30, 1444, pp. 1–22, 2025. <https://doi.org/10.3390/molecules30071444>
25. R. A. W. Sing, K.S.W., Everet, D. H., Haul, "Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity," *Pure Appl. Chem.*, vol. 57, no. 4, pp. 603–619. 1985.

Análisis de algoritmos evolutivos contemporáneos en la optimización de distribución de parques eólicos

Eduardo H. Haro¹, Alfonso Ramos-Michel¹, Jorge Arturo Pelayo López¹

¹Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara CUCSUR, Av. Independencia Nacional No. 151, Autlán de Navarro, Jalisco, México

Resumen: Los parques eólicos representan una de las principales apuestas sustentables para el futuro. Sin embargo, uno de sus obstáculos es lograr una distribución óptima. Este problema es conocido como optimización de distribución de parques eólicos, y su solución garantiza la mayor producción energética posible al menor costo de instalación. Para ello, se han utilizado diversas herramientas computacionales, siendo el algoritmo de evolución diferencial una de las mejores alternativas. Por esta razón, en el presente trabajo se presenta un análisis comparativo entre diversas variantes de dicho algoritmo, propuestas durante la última década. Con el fin de comprender las ventajas y limitaciones de estas variantes, se propone la optimización de un problema de distribución de parques eólicos mediante un caso experimental. Los resultados muestran las ventajas de estos algoritmos en términos de precisión y costo computacional, al mismo tiempo que se destacan las principales características de estos algoritmos que contribuyen específicamente a la distribución de parques eólicos.

1. Introducción

Los sistemas de energía sustentable son uno de los pilares científicos en la actualidad debido a sus implicaciones para nuestro desarrollo futuro, el cual, depende en gran medida de nuestra capacidad para cubrir la demanda energética mundial sin afectar al medio ambiente. En ese sentido, dentro de las alternativas energéticas, la energía eólica se posiciona como uno de los mejores métodos en términos de producción y costo [1]. Desafortunadamente, este método requiere de grandes extensiones territoriales dónde colocar las decenas de turbinas eólicas y dicho territorio requiere a su vez condiciones geográficas específicas para hacer viable la construcción del parque, lo que provoca que no puedan desarrollarse en cualquier lugar [1]. Por ello, es imperativo distribuir lo mejor posible dichas turbinas para obtener el mayor beneficio energético del parque, y este problema de distribución se conoce como Optimización de Distribución de Parques Eólicos – Wind Farm Layout Optimization (WFLO, por sus siglas en inglés) [2].

Existen diversas maneras de afrontar el problema WFLO, no obstante, las mejores alternativas siempre han sido los modelos computacionales basados en sistemas de Inteligencia Artificial (IA) [3]. Precisamente, los sistemas de IA más aplicados a la solución del WFLO han sido los algoritmos metaheurísticos, los cuáles se caracterizan entre otras cosas, por tratarse de modelos de optimización cuyo comportamiento iterativo se inspira en procesos biológicos tales como métodos de

Recibido: mayo 15, 2025

Aceptado: julio 24, 2025

autor de correspondencia:
eduardo.hernandezh@academicos.udg.mx

© 2025 Revista Ciencia Aplicada

caza de algunos animales, métodos de reproducción, o incluso fenómenos naturales [4]. Si bien, los algoritmos metaheurísticos existen desde los años 60s, su aplicación en el problema WFLO se dio durante la década de los 90s y hoy en día sigue siendo uno de los temas más importantes en la optimización de sistemas de energía. Ahora bien, dentro de los algoritmos utilizados para esta optimización uno de los que más destaca es el algoritmo Evolución Diferencial – Differential Evolution (DE, por sus siglas en inglés). Este algoritmo fue propuesto en 1997 por Storn y Price [5], y ha generado una gran cantidad de variantes debido a su diseño simple y eficiente desempeño, por lo que, a día de hoy el DE es uno de los pilares de la optimización metaheurística.

El DE y sus variantes han demostrado un gran desempeño en la solución del WFLO, lo cual, es debido en gran medida a su adaptabilidad en los espacios de búsqueda. Mientras otras metaheurísticas como las bio-inspiradas funcionan a base de modelos matemáticos complejos que suelen verse afectados al enfrentar problemas restrictivos, los algoritmos evolutivos como el DE usan esto a su favor adaptando el movimiento de sus partículas al entorno de búsqueda, lo que hace que el DE y sus variantes tengan una ventaja natural sobre los bio-inspirados en problemas como el WFLO.

Precisamente, son estas características las que han propiciado que algunas de estas variantes hayan sido aplicadas a modelos de WFLO como el Evolución Diferencial basado en memoria histórica adaptada - Success-History based Adaptive Differential Evolution (SHADE, por sus siglas en inglés) o variantes ofreciendo resultados interesantes. No obstante, es importante mencionar que la gran mayoría de trabajos relacionados tienden a modificar al algoritmo de tal modo que se adapte de forma muy específica al problema, como es el caso del SHADE adaptado mediante una búsqueda multi local – Multi local Search SHADE (MS-SHADE, por sus siglas en inglés) [6]. En principio, no hay problema con dichos cambios pues los resultados son competentes, sin embargo, se trata de algoritmos tan especializados en un problema particular que involucra rehacer adaptaciones para otros problemas, por lo que el algoritmo base no demuestra ser eficiente en sí mismo.

Sin embargo, esta creciente publicación de nuevas variantes del DE, así como el desarrollo de modelos WFLO cada vez más sofisticados, crean la necesidad de conocer las ventajas y limitaciones de este algoritmo en la actualidad para la solución de dicho problema. Si bien, existen algunos trabajos que recopilan los avances más importantes relacionados, no existe hasta la fecha de la creación de este artículo un trabajo que analice exclusivamente el impacto del DE y sus variantes contemporáneas [7]. Por ende, para solventar esta carencia antes mencionada, en este trabajo de investigación se presenta un estudio comparativo entre el DE y ocho de sus variantes más importantes de la última década. Para ello, se analiza el desempeño de dichos algoritmos en un problema WFLO que consta de un caso de estudio de eclipse completo. Respecto a los algoritmos a comparar, se toma a

consideración únicamente variantes del DE en su forma base, es decir, para ofrecer una experimentación justa solo se comparan algoritmos no adaptados específicamente al problema WFLO. Por otra parte, el término eclipse hace referencia a un fenómeno conocido como efecto estela, el cual ocurre cuando dos turbinas dentro de un parque eólico se encuentran lo suficientemente próximas como para que la primera genere una estela que afecte el rendimiento operacional de la segunda [8]. Los resultados obtenidos muestran las grandes capacidades operacionales del DE y sus variantes. Sin embargo, una variante en particular demostró ser superior al resto de competidores en términos de estabilidad, precisión, costo computacional y tasa de convergencia.

El resto del artículo se estructura de la siguiente forma, la Sección 2 explica en mayor detalle el problema WFLO, la estructura del DE y sus variantes utilizadas en este estudio son analizadas en la Sección 3, en la sección 4 se analiza la forma de optimizar el WFLO, mientras que los resultados computacionales se presentan en la Sección 5, finalmente, la Sección 6 discute las conclusiones y posibles trabajos futuros.

2. El problema de distribución de parques eólicos

Tal como se explicó anteriormente, en los parques eólicos existe un fenómeno conocido como efecto estela, el cual consiste en la creación de perturbación eólica provocada por una turbina hacia una segunda turbina. Esto a su vez genera que la turbina afectada presente un rendimiento operacional inestable y hasta indeseable. Es por ello que, para conocer el impacto y características correctas de un efecto estela en una turbina se han diseñado diversos modelos matemáticos que busca predecir este comportamiento. En este trabajo de investigación se abordará el modelo de Jensen propuesto en 1983 [9]. Dicho modelo considera una velocidad de viento constante V_0 , la cual, al impactar sobre una turbina genera un efecto estela con diámetro inicial D_0 y vertiente k que depende directamente de la distancia x a la que se encuentre la segunda turbina. Una vez que la estela impacta sobre esta segunda turbina, la velocidad del viento cambia a $V(x)$ afectando la turbina en un área $D(x)$; este comportamiento se aprecia en la Figura 1.

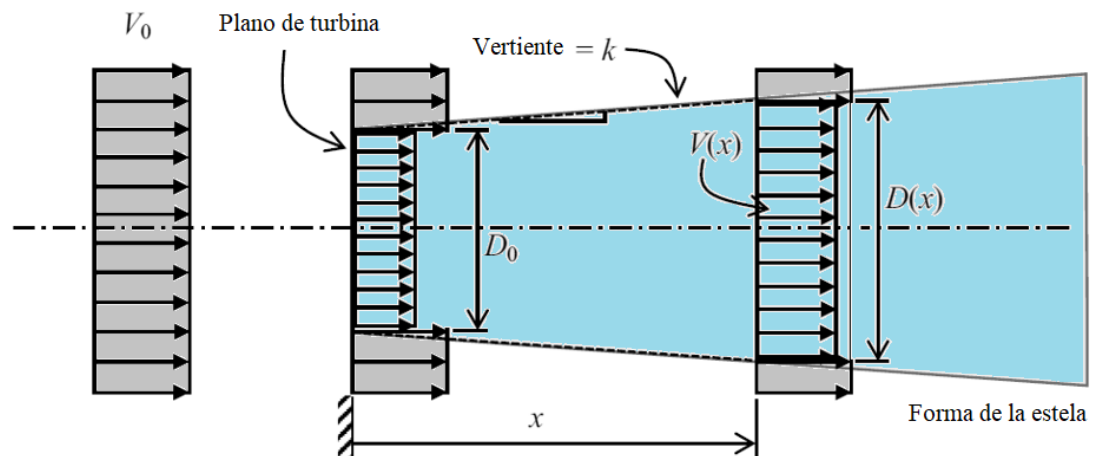


Figura 1. Modelo de decaimiento del efecto estela.

Con base en el modelo de Jensen, la velocidad del viento se describe como:

$$1 - \frac{V(x)}{V_0} = \alpha \left(\frac{D_0^2}{D(x)^2} \right) \quad (1)$$

donde, el diámetro de la estela en la turbina afectada $D(x)$ se calcula como se muestra en la Ecuación 2. En dicha ecuación, k establece un valor constante que define la altura del poste de la turbina y la rugosidad del terreno del parque eólico. Por otra parte, al retornar a la Ecuación 1, otro valor a considerar es α , el cual establece el déficit de velocidad en el área de la estela y se modela como se muestra en la Ecuación 3, en donde C_T corresponde al coeficiente de empuje de la turbina.

$$D(x) = D_0 + 2kx \quad (2)$$

$$\alpha = 1 - \sqrt{1 - C_T} \quad (3)$$

Hasta este momento solo se ha considerado el hecho de que el efecto estela se produzca entre dos turbinas, sin embargo, en un parque eólico real este efecto se produce desde múltiples direcciones. Por ello, es importante considerar este efecto de manera dinámica y para tal caso se modela dicha energía como lo muestra la Ecuación 4.

$$\left(1 - \frac{V}{V_0} \right)^2 = \sum_{i=1}^{N_{EC}} \left(1 - \frac{V(x_i)}{V_0} \right)^2 \quad (4)$$

En esta ecuación, N_{EC} establece el número de turbinas que eclipsan a la turbina a analizar, siendo i precisamente el número de turbina actual y $V(x_i)$ su velocidad de viento correspondiente. Con base en todo lo anterior, se puede calcular la energía total producida por el parque eólico de la siguiente manera:

$$P_t = \sum_{i=1}^{N_{WT}} \frac{1}{2} \eta_i \rho_{air} A_i V_i^3 \quad (5)$$

donde, N_{WT} es el número total de turbinas en el parque eólico, mientras que η_i y ρ_{air} corresponden a la eficiencia de la turbina y la densidad del aire, respectivamente. Por otra parte, la velocidad del viento V_i^3 se establece en m/s mientras que el área del disco de la turbina A_i , así como su intersección con otra turbina se modela mediante la Ecuación 6.

$$A_{i,j} = r_i^2 \cos^{-1} \left(\frac{d_{i,j}^2 + r_i^2 - r_j^2}{2d_{i,j}r_i} \right) + r_j^2 \cos^{-1} \left(\frac{d_{i,j}^2 + r_j^2 - r_i^2}{2d_{i,j}r_j} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{(-d_{i,j} + r_i + r_j)(d_{i,j} - r_i + r_j)(-d_{i,j} + r_i - r_j)(d_{i,j} + r_i + r_j)} \quad (6)$$

En esta ecuación, $d_{i,j}$ corresponde a la distancia entre los centros de ambas turbinas, mientras que r_i y r_j son los radios de las estelas de las turbinas i y j , respectivamente. La Figura 2 simplifica la explicación de la Ecuación 6, en donde la turbina j es parcialmente eclipsada por la turbina i mediante el efecto estela. Finalmente, cabe mencionar que esta intersección de ambas turbinas está dada por $A_{i,j}$ que a su vez corresponde al diámetro del eclipse.

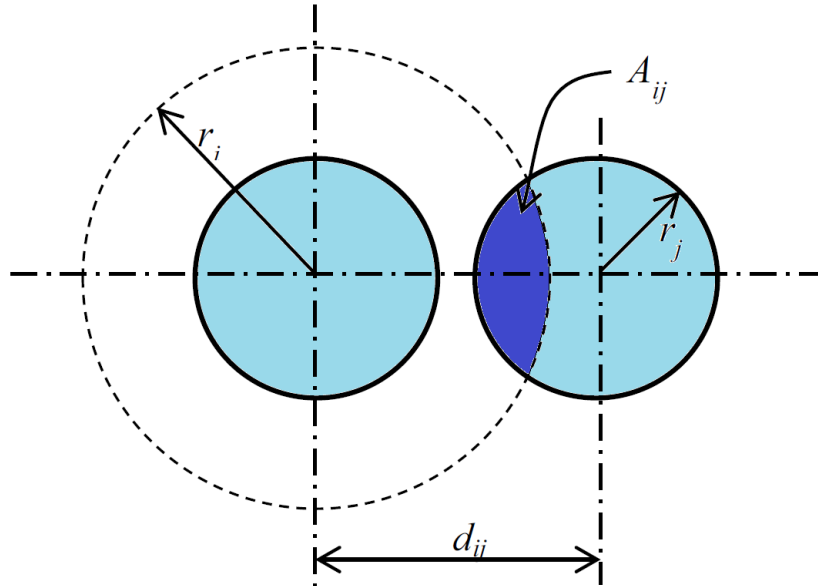


Figura 2. Intersección entre dos turbinas.

3. Algoritmo DE

El algoritmo DE fue propuesto en 1997 por los investigadores Storn y Price con el propósito de optimizar funciones generales. No obstante, el diseño simple y buena eficiencia del mismo hicieron que este algoritmo rápidamente se convirtiera en uno de los pilares del cómputo evolutivo [10]. En términos sencillos, el DE se compone de tres partes fundamentales, la mutación, el cruzamiento y la selección. Sin embargo, como cualquier otro algoritmo metaheurístico, el DE comienza con una etapa de inicialización en donde se establecen los parámetros y creación de la población inicial de soluciones X_i^G , en donde i establece la solución actual dentro de un conjunto de soluciones desde 1 hasta N , mientras que G corresponde a la señalización de la población general. La definición de esta población inicial se da mediante la siguiente expresión:

$$X^G = L_B + (U_B - L_B) \times rand(d, N) \quad (7)$$

donde, L_B y U_B corresponden a los límites inferior y superior de cada individuo, respectivamente, mientras que d establece las dimensiones o variables de cada individuo. Una vez inicializada y evaluada toda la población inicial en la respectiva función objetivo, el DE da paso a su primera etapa específica antes mencionada que es la mutación. Existen una enorme cantidad de métodos de mutación para el DE, esto debido a que dicha etapa está directamente relacionada con la exploración del algoritmo, por lo que su constante mejoramiento ha sido uno de los pilares de las variantes del DE [11]. Sin embargo, en este trabajo se analizará la mutación original del DE propuesta por sus respectivos autores y conocida como DE/rand/1. Esta mutación establece la selección aleatoria de tres individuos ($X_{r1}^G, X_{r2}^G, X_{r3}^G$) dentro de la población actual para posteriormente introducirlos a la ecuación de mutación siguiente:

$$v_i^{G+1} = X_{r1}^G + F \cdot (X_{r2}^G - X_{r3}^G) \quad (8)$$

donde, v_i^{G+1} es el vector mutado resultante de la mutación de los tres individuos seleccionados aleatoriamente, mientras que F es un factor de escalamiento constante comprendido entre 0.5 y 0.8. Una vez conseguido el vector mutado, este se usa para conseguir el vector cruzado en la segunda etapa del DE que es precisamente el cruzamiento. Al igual que en la mutación, existen múltiples métodos de cruzamiento para el DE, esto debido a que está directamente relacionado con la explotación del algoritmo. No obstante, en este trabajo se explicará el cruzamiento binomial, que es el propuesto originalmente para el DE. En este cruzamiento primero se establece una tasa de cruce constante C_r generalmente definida entre 0.1 y 0.3. Posteriormente, el vector cruzado u_i^{G+1} se va creando iterativamente para cada una de sus dimensiones considerando al vector mutado v_i^{G+1} y al individuo actual de la población X_i^G . Para definir cuál de los individuos será utilizado en la respectiva dimensión se utiliza la siguiente ecuación:

$$u_i^{G+1} = u_d^G \begin{cases} v_{i,d}^G \rightarrow d = d_{rand} \\ v_{i,d}^G \rightarrow rand(0,1) \leq C_r \\ X_{i,d}^G \rightarrow Otro\ caso \end{cases} \quad (9)$$

donde, u_d^G es la dimensión actual del vector cruzado u_i^{G+1} , mientras que $v_{i,d}^G$ y $X_{i,d}^G$ corresponden a las dimensiones actuales del vector mutado y el individuo actual, respectivamente. Por otra parte, d_{rand} es un número aleatorio definido entre 1 y d , y el cual debe cambiar en cada iteración. Este vector cruzado corresponde a un nuevo individuo, el cual pasa a la siguiente y última etapa del DE que es la selección. A diferencia de los dos operadores anteriores, la selección es una etapa que no ha sido tan explorada en la literatura, correspondiendo únicamente al 2% de las variantes del DE [12]. En este caso, se utiliza la selección original del algoritmo, la cual es conocida como selección elitista y consiste únicamente en evaluar a u_i^{G+1} en la función objetivo y comparar su valor fitness con el de X_i^G . Al obtener un vencedor, ya sea en términos de minimización o maximización, dicho individuo ocupará el espacio de X_i^G dentro de la población actual. Finalmente, todo este proceso se repite iterativamente hasta completar un cierto número de generaciones o accesos a función, entendiendo a una generación como el hecho de que todos los individuos de la población actual hayan participado en el proceso de la Ecuación 9, mientras que los accesos a función son básicamente el número de evaluaciones en la función objetivo.

4. Optimización del WFLO

Existen múltiples formas de interpretar la distribución de turbinas en un parque eólico en el WFLO, esto incluye la distribución en un campo con restricciones territoriales que complejizan aún más el modelo. No obstante, la mayoría de estos parques son colocados en la costa para aprovechar los vientos marinos, lo cual involucra no considerar restricciones territoriales, que es justo el modelo que se usará en este trabajo [13]. Con base en ello, la función objetivo a optimizar considerará dos puntos de equilibrio, el costo económico de instalación del parque, así como la potencia energética total suministrada por el mismo, buscando así un equilibrio entre ambas partes. Es decir, la función objetivo $f(x)$ buscará la distribución que permita obtener la mayor eficiencia energética (P_t) del parque al menor costo de instalación posible. Dicha función se aprecia a continuación:

$$f(x) = \frac{Costo}{P_t} \quad (10)$$

donde P_t corresponde a la energía total entregada por el parque y previamente descrita en la Ecuación 5, mientras que $Costo$ establece precisamente el costo económico de la instalación del parque y se puede describir de la siguiente forma:

$$Costo = N_T \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0.00174 \times N_T^2} \right) \quad (11)$$

donde N_T denota el número total de turbinas en el parque. Por otra parte, un parque eólico real usualmente requiere una extensión territorial de 2000 m^2 , por lo que para efectos de este experimento computacional se dimensionará dicha extensión a una cuadrícula de 10×10 espacios que simularán una extensión territorial de 200 m^2 cada uno y en donde solo se podrá albergar una turbina eólica, lo cual a su vez permite que el parque entero tenga una disponibilidad máxima para 100 turbinas. Esto se hace con la intención de dar más realismo a la simulación, pues se debe considerar que el diámetro que ocupan las hélices de la turbina es de 5 veces el tamaño del diámetro del rotor, tal como sucede en la mayoría de turbinas reales.

Para comprender las especificaciones de las turbinas a considerar en este trabajo, se presenta la Tabla 1, en donde lo más destacable es la velocidad del viento, la cual será de 12 m/s , que tiende a ser la media en este tipo de instalaciones. Finalmente, para el diseño del parque eólico que como se mencionó anteriormente consistirá de una cuadrícula de 100 espacios, su distribución es la presentada en la Figura 3, donde se puede notar que la distribución es de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. La distribución mostrada en dicha figura es solo representativa por lo que no corresponde a un resultado en particular, mostrando en cada celda del hipotético parque eólico la posición y numeración de cada turbina.

Tabla 1. Características de la turbina eólica.

Característica	Valor
Coeficiente de empuje (C_T)	0.88
Rugosidad de la superficie (h_0)	0.3
Altura del poste (h)	60 m
Diámetro del rotor (D_0)	40 m
Eficiencia de la turbina (η)	40 %
Densidad del aire (ρ_{air})	1.225 kg/m^3
Velocidad del viento (V_0)	12 m/s
Direcciones del viento ($^\circ$)	10, 20, 30, ..., 360

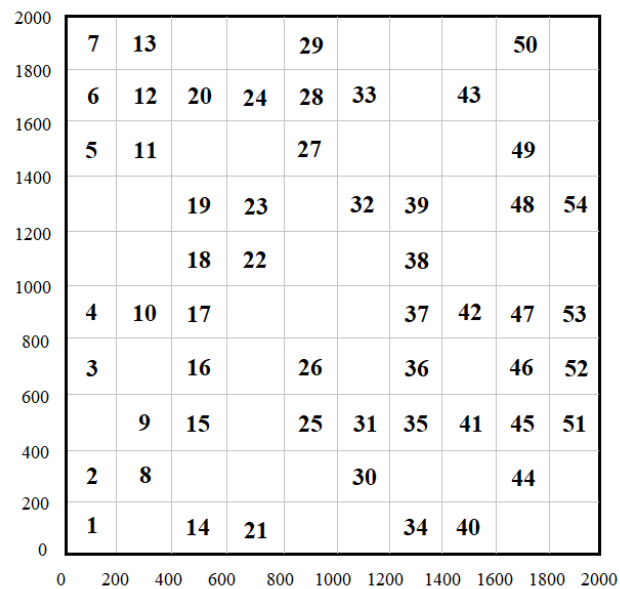


Figura 3. Distribución de las turbinas en el parque eólico.

5. Resultados computacionales

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos por el DE y diversas variantes en la optimización del WFLO explicado en las secciones anteriores. Tal como se mencionó en la introducción, el DE se compone de tres etapas fundamentales que son la mutación, el cruzamiento y la selección, así como la inicialización que tienen la gran mayoría de algoritmos metaheurísticos. Con base en eso, los algoritmos variantes seleccionados para competir contra el DE son dos enfocados en nuevos métodos de inicialización, el Evolución diferencial basado en clusterización - Differential Evolution based on Clustering (DEc) [14], y el Evolución diferencial caótico oposicional - Chaotic Oppositional Differential Evolution (CODE) [15]. De igual forma, se proponen otros dos enfocados en nuevas mutaciones, la Mutación basada en población histórica en el evolución diferencial - Historical population based mutation strategy in Differential Evolution (Hip-DE) [16], y el Evolución diferencial con mutación basada en la biología - Differential Evolution with biological based mutation (DE-HeO) [17]; mientras que por el lado del cruzamiento se propone el uso del Evolución diferencial con cruzamiento basado en enlace híbrido - Differential Evolution with Hybrid Linkage Crossover (HLXDE) [18], y el Cruzamiento diferencial epistático basado en grafos cartesianos en ensamble con el evolución diferencial - epistatic Differential Crossover based on Cartesian graph product in ensemble DE (eXEDE) [19]. Finalmente, también se propone el uso de dos variantes del DE enfocadas en un nuevo operador de selección, que son el Evolución diferencial con selección elitista de ruleta - Roulette wheel selection-Elitist-Differential Evolution (ReDE) [20] y el Evolución diferencial con selección basada en configuración paramétrica individual - Differential Evolution with

improved individual-based parameter setting and selection strategy (IDEI) [21]. Todos estos algoritmos compitieron en igualdad de oportunidades, con una población inicial de 100 individuos, 50,000 accesos a función y con 35 ejecuciones independientes.

Respecto a los últimos dos datos mencionados es importante aclarar que existe la posibilidad de considerar como criterio de paro un factor externo a las iteraciones del algoritmo, como lo es un criterio por tiempo de ejecución o por una perturbación externa. Sin embargo, no es lo ideal hacer algo así, debido a que no se le daría a cada algoritmo la oportunidad de demostrar su real desempeño en igualdad de oportunidades. Esto es debido a que algunos algoritmos contienen más acceso a función por iteración que otros, por lo que ejecutar por tiempo o perturbación solo provocaría que algunos métodos logren entregar todo su desempeño y otros no, creando una competencia injusta. Por otra parte, en este tipo de experimentaciones computacionales siempre se consideran 35 ejecuciones independientes debido a que es la cantidad de datos mínimos requeridos por pruebas no paramétricas para ofrecer una estadística correcta.

La parametrización interna de cada algoritmo se basó en la estipulada por sus autores en los respectivos artículos originales, mientras que para el DE se usó un factor de escalamiento de 0.8 y una tasa de cruzamiento de 0.2. Finalmente, cabe mencionar que el desarrollo y ejecución de los algoritmos, así como del WFLO fueron realizados en el entorno de programación de MATLAB en una Notebook (Procesador AMD de 2.7 GHz, 8 GB de RAM) con sistema operativo Windows 10.

Primeramente, los resultados métricos de los algoritmos respecto a la función objetivo de la Ecuación 10 se pueden apreciar en la Tabla 2. Como se puede notar, se consideran cinco métricas, tres relacionadas directamente al valor fitness que son el mejor, el peor y el promedio, siendo este último una ponderación de las 35 ejecuciones independientes. Por otra parte, se consideran también dos métricas no relacionadas con el valor fitness sino con la ejecución general de cada algoritmo, que son la Desviación estándar – Standard Deviation (STD, por sus siglas en inglés) y el tiempo computacional medido en segundos [22]. Respecto al STD, se trata de una métrica que permite analizar la desviación o diferencia general que existe entre cada uno de los 35 resultados de un algoritmo, donde evidentemente lo ideal es tener un STD de cero, lo que implicaría que todos los resultados son exactamente iguales. Mientras que el tiempo computacional se refiere al tiempo requerido por el algoritmo para optimizar el WFLO las 35 veces, por lo que el dato apreciado no es la sumatoria de los 35 tiempos, sino el promedio de ellos.

Con base en lo anterior, se puede ver que, de todos los métodos, el IDEI presenta el mejor desempeño respecto a los resultados mejor y promedio, mientras que el propio DE obtiene dentro de los peores resultados, el mejor. De igual forma, este mismo algoritmo consiguió el mejor tiempo computacional con solo 531.21

segundos de ejecución. No obstante, es lógico que el DE sea el mejor método en este rubro pues todos los demás algoritmos son variantes que agregan etapas al DE original, lo cual inherentemente repercute en un mayor costo computacional respecto al DE. Finalmente, la mejor estabilidad es reportada por el Hip-DE, aunque es importante mencionar que estabilidad no es lo mismo que precisión, pues se puede apreciar que dicho algoritmo es estable pero dentro de resultados alejados del mejor competidor que es el IDEI.

Tabla 2. Resultados métricos de los algoritmos.

Algoritmo	Mejor	Promedio	Peor	STD	Tiempo (s)
DE	0.001455	0.001460	0.001466	1.63E-04	523.21
DEc	0.001459	0.001462	0.001473	2.55E-05	544.58
CODE	0.001452	0.001459	0.001468	3.17E-04	613.04
Hip-DE	0.001463	0.001471	0.001475	1.08E-04	546.11
DE-HeO	0.001459	0.001467	0.001474	1.74E-06	623.05
HLXDE	0.001456	0.001462	0.001469	5.21E-04	601.45
eXEDE	0.001461	0.001470	0.001475	2.06E-05	578.23
ReDE	0.001460	0.001477	0.001483	3.11E-06	591.09
IDEI	0.001451	0.001458	0.001467	1.28E-04	535.37

Otro aspecto crucial a considerar en este tipo de trabajos es la tasa de convergencia de cada algoritmo. La convergencia no es otra cosa más que el ritmo con el que el algoritmo logra ir encontrando mejores resultados a lo largo del proceso iterativo. En ese sentido, lo ideal es encontrar una gráfica que alcance lo más rápido posible el óptimo resultado sin sufrir estancamientos. Para ello, se muestran las convergencias de todos los algoritmos en la Figura 4, donde claramente se puede notar que nuevamente el IDEI (línea azul) corresponde al mejor algoritmo, pues alcanza su óptimo resultado alrededor de los 1000 accesos a función. También se puede notar que el IDEI es seguido por el CODE (línea naranja) y el HLXDE (línea negra), quienes consiguen su mejor resultado en aproximadamente 1100 y 6000 accesos a función, respectivamente. En contraparte, el Hip-DE (línea amarilla) demuestra ser el peor algoritmo en términos de convergencia pues se estanca desde antes de la mitad del proceso iterativo, seguido por el eXEDE (línea roja) y el DEc (línea cian), quienes presentan comportamientos similares.

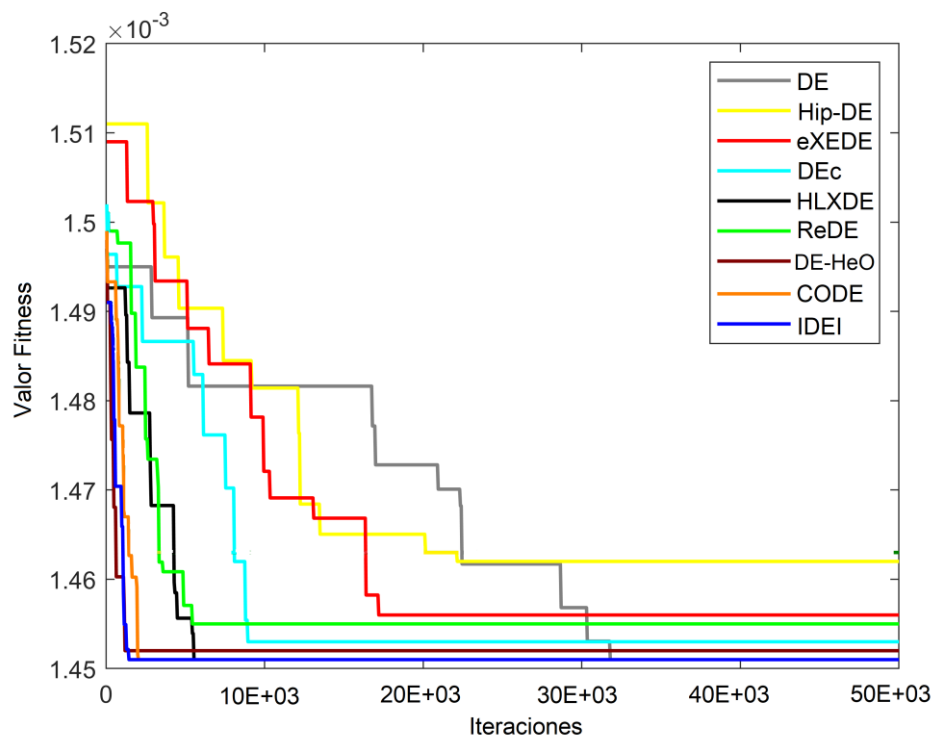


Figura 4. Convergencias de los algoritmos.

Tal como se mencionó anteriormente, el objetivo de la optimización del WFLO es encontrar la distribución óptima de turbinas que permitan reducir los costos de instalación lo más posible, al mismo tiempo que se obtiene el mayor suministro energético. Es por ello que, la Tabla 3 presenta dicha relación para cada uno de los algoritmos considerando el número de turbinas, costo de instalación y energía entregada, esto con base en el mejor resultado obtenido de la Tabla 2. Con base en lo anterior, se puede apreciar que el IDEI propone una distribución de solo 39 turbinas, que corresponde al menor número posible y cuyo costo de instalación representa 29.9216 unidades de costo, mientras que la energía suministrada con esta distribución es de 18,446.80 kW, que evidentemente es la menor de todas.

Por el contrario, el eXEDE propone el mayor número de turbinas con un total de 50, que a su vez representa el costo más alto con 36.0218 unidades de costo, pero con la mayor energía suministrada, 27,336.22 kW. Teniendo en cuenta que ambos algoritmos se ubican en polos opuestos de la distribución óptima se puede calcular que con 44 turbinas se obtiene el balance adecuado. Por ello, al observar la Tabla 3 se puede notar que tanto el DEc como el DE-HeO cumplen con esa condición, con la diferencia de que este último ofrece un mayor suministro energético, por lo que podemos aseverar que, aunque el DE-HeO no se caracteriza por tener las mejores métricas, sí entrega un balance adecuando entre costo y energía.

Tabla 3. Relación costo/energía de los algoritmos.

Algoritmo	Turbinas	Costo de instalación	Energía entregada
DE	41	28.1116	20,156.04 kW
DEc	44	30.0376	22,355.11 kW
CODE	40	27.1892	19,378.05 kW
Hip-DE	48	34.1255	25,176.34 kW
DE-HeO	44	30.1056	22,359.18 kW
HLXDE	43	29.1633	21,889.08 kW
eXEDE	50	36.0218	27,336.22 kW
ReDE	49	35.6614	26,057.09 kW
IDEI	39	26.9216	18,446.80 kW

Con base en la Tabla 3, es importante conocer la distribución propuesta por los algoritmos, que para fines de este trabajo se presentan las distribuciones tanto del IDEI como del DE-HeO en las figuras 5 y 6, respectivamente. Por una parte, el IDEI presenta una distribución de turbinas principalmente colocadas a lo largo del perímetro del parque, con únicamente 8 turbinas en el interior del mismo. Esto es crucial pues cuantas más turbinas haya en el interior del parque, mayor número de turbinas sufrirán del efecto estela explicado anteriormente. Por otra parte, el DE-HeO presenta de igual forma una distribución principalmente perimetral, pero considerando 10 turbinas en el interior del parque. Aunado a esto, el DE-HeO comete el error de quitar una turbina del perímetro donde impacta el viento, lo cual incrementa el efecto estela para las turbinas internas, mientras que el IDEI no comete este error, teniendo todo ese sector cubierto de turbinas que aprovechan todo el viento disponible. Por ende, se puede afirmar que, aunque el DE-HeO ofrece la mayor energía, el IDEI propone la mejor distribución eólica.

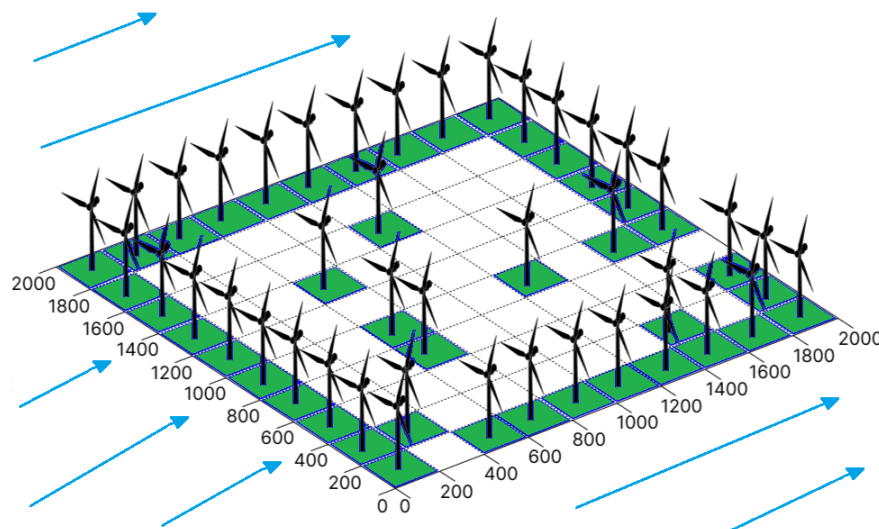


Figura 5. Distribución eólica propuesta por el IDEI.

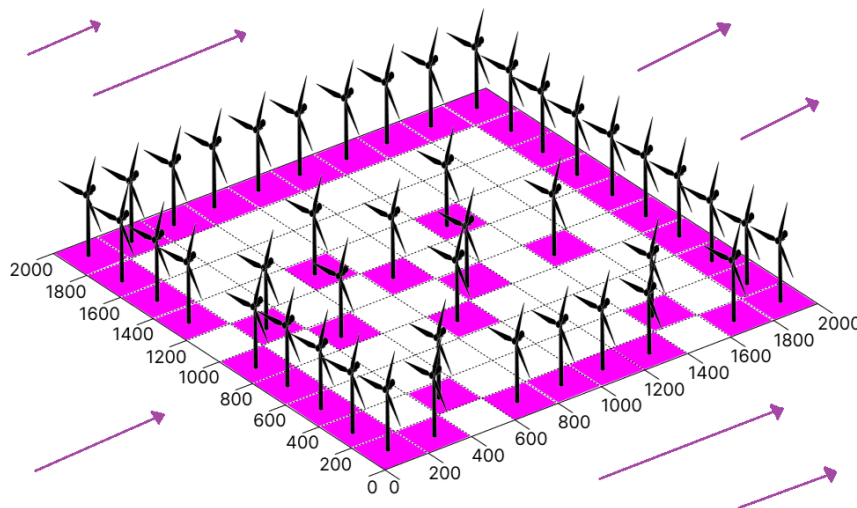


Figura 6. Distribución eólica propuesta por el DE-HeO.

Para concluir la experimentación, es importante analizar el rendimiento operacional de los algoritmos desde una perspectiva estadística sofisticada, por lo que para ello se propone la prueba de Friedman [23]. Esta prueba no paramétrica se caracteriza por comparar a un grupo completo de individuos cuyos resultados sean independientes entre sí, ofreciendo un p -valor para cada uno que determina si existe o no una diferencia significativa contra una hipótesis nula. Para mayor comprensión de este y otras pruebas no paramétricas se invita al lector a consultar las siguientes referencias [23, 24]. Un aspecto importante de la prueba de Friedman es que ofrece un ranking general de los métodos analizados, por lo que se puede saber con precisión cuál es mejor que otro. De igual forma, es importante mencionar que tal como se describió al inicio de la sección, este tipo de pruebas requieren un mínimo de 35 datos independientes para poder realizar la comparación estadística, razón por la cual se realizaron 35 ejecuciones independientes para cada algoritmo. Para este trabajo, dicho análisis se muestra en la Tabla 4, donde se puede apreciar que el IDEI consigue la mejor posición con un p -valor de 3.19E-02, mientras que sus competidores directos como el CODE o el DE-HeO se ubican en las posiciones 2 y 5 con p -valores de 4.11E-02 y 5.06E-03, respectivamente.

Tabla 4. Resultados de la prueba de Friedman.

Algoritmos	p -valores	Ranking
DE	7.09E-02	3
DEc	9.66E-03	6
CODE	4.11E-02	2
Hip-DE	4.55E-04	7
DE-HeO	5.06E-03	5
HLXDE	1.41E-03	4

eXEDE	2.67E-05	9
ReDE	8.10E-04	8
IDEI	3.19E-02	1

6. Conclusiones

En este trabajo se presentó un análisis comparativo entre el algoritmo DE y algunas de sus variantes más contemporáneas para la solución del problema WFLO, el cual es uno de los pilares de la optimización de sistemas de energía en la actualidad. Específicamente, se utilizó un modelo de Jensen sin restricciones territoriales y considerando un máximo de 100 turbinas eólicas. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad del uso de estos algoritmos para la solución de este problema, dado su buen desempeño, estabilidad y costo computacional. No obstante, existe un algoritmo que logró resaltar de entre todos, el IDEI. Esta variante propuesta en 2017 se caracteriza por enfocar su mejora en la etapa de selección del DE. Los resultados posicionaron al IDEI como el mejor en términos de precisión, convergencia y estabilidad no paramétrica. De igual forma, el IDEI fue capaz de entregar una distribución eólica bastante competente que permite ser replicada en modelos más complejos.

Por otra parte, es importante mencionar que ningún algoritmo fue capaz de entregar altas capacidades de energía con menos de 40 turbinas, lo cual indica que su factor evolutivo tiende a beneficiar siempre al número de turbinas en lugar de la potencia entregada. Esto podría solucionarse con la hibridación de un modelo evolutivo con las ventajas de un sistema bio-inspirado. También, como algunos de los trabajos futuros que pueden surgir es la aplicación del IDEI en modelos eólicos como el de Larsen o variantes más sofisticadas del de Jensen. Otro importante aporte es analizar el comportamiento de estos algoritmos desde una perspectiva multiobjetivo para obtener un resultado más cohesivo.

Referencias

1. P. Hou et al., "A review of offshore wind farm layout optimization and electrical system design methods," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 975–986, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40565-019-0550-5>
2. M. Samorani, "The wind farm layout optimization problem," in *Handbook of Wind Power Systems*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, pp. 21–38. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41080-2_2
3. Y. Chen, H. Li, K. Jin, and Q. Song, "Wind farm layout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines," *Energy Convers. Manag.*, vol. 70, pp. 56–65, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.007>
4. M. Abdel-Basset, L. Abdel-Fatah, and A. K. Sangaiah, "Metaheuristic algorithms: A comprehensive review," in *Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications*, 2018, pp. 185–231. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813314-9.00010-4>

5. R. Storn and K. Price, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *J. Global Optim.*, vol. 11, pp. 341–359, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
6. Y. Yang, S. Tao, H. Li, H. Yang, and Z. Tang, "A multi-local search-based SHADE for wind farm layout optimization," *Electronics*, vol. 13, no. 16, p. 3196, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13163196>
7. J. J. Thomas et al., "A comparison of eight optimization methods applied to a wind farm layout optimization problem," *Wind Energy Sci.*, vol. 8, no. 5, pp. 865–891, 2023. <https://doi.org/10.5194/wes-8-865-2023>
8. H. Sun, X. Gao, and H. Yang, "A review of full-scale wind-field measurements of the wind-turbine wake effect and a measurement of the wake-interaction effect," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 132, p. 110042, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110042>
9. R. Shakoor, M. Y. Hassan, A. Raheem, and Y. K. Wu, "Wake effect modeling: A review of wind farm layout optimization using Jensen's model," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1048–1059, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.229>
10. K. R. Opara and J. Arabas, "Differential Evolution: A survey of theoretical analyses," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 44, pp. 546–558, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.06.010>
11. K. Opara and J. Arabas, "Comparison of mutation strategies in differential evolution—a probabilistic perspective," *Swarm Evol. Comput.*, vol. 39, pp. 53–69, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.12.007>
12. Z. Zeng, M. Zhang, T. Chen, and Z. Hong, "A new selection operator for differential evolution algorithm," *Knowl.-Based Syst.*, vol. 226, p. 107150, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107150>
13. K. Yang, G. Kwak, K. Cho, and J. Huh, "Wind farm layout optimization for wake effect uniformity," *Energy*, vol. 183, pp. 983–995, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.019>
14. D. Bajer, G. Martinović, and J. Brest, "A population initialization method for evolutionary algorithms based on clustering and Cauchy deviates," *Expert Syst. Appl.*, vol. 60, pp. 294–310, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.05.009>
15. M. F. Ahmad, N. A. M. Isa, W. H. Lim, and K. M. Ang, "Differential evolution with modified initialization scheme using chaotic oppositional based learning strategy," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 12, pp. 11835–11858, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.05.028>
16. Z. Meng and C. Yang, "Hip-DE: Historical population-based mutation strategy in differential evolution with parameter adaptive mechanism," *Inf. Sci.*, vol. 562, pp. 44–77, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.01.031>
17. S. Prabha and R. Yadav, "Differential evolution with biological-based mutation operator," *Eng. Sci. Technol., Int. J.*, vol. 23, no. 2, pp. 253–263, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.05.012>
18. Y. Cai and J. Wang, "Differential evolution with hybrid linkage crossover," *Inf. Sci.*, vol. 320, pp. 244–287, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.05.026>
19. I. Fister, A. Tepeh, and I. Fister Jr., "Epistatic arithmetic crossover based on Cartesian graph product in ensemble differential evolution," *Appl. Math. Comput.*, vol. 283, pp. 181–194, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2016.02.034>
20. V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, T. Truong-Khac, L. Le-Anh, and T. Vo-Duy, "An improved differential evolution based on roulette wheel selection for shape and size optimization of truss structures

- with frequency constraints," *Neural Comput. Appl.*, vol. 29, pp. 167–185, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2426-1>
21. M. Tian, X. Gao, and C. Dai, "Differential evolution with improved individual-based parameter setting and selection strategy," *Appl. Soft Comput.*, vol. 56, pp. 286–297, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.03.010>
 22. E. H. Livingston, "The mean and standard deviation: what does it all mean?" *J. Surg. Res.*, vol. 119, no. 2, pp. 117–123, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2004.02.008>
 23. M. R. Sheldon, M. J. Fillyaw, and W. D. Thompson, "The use and interpretation of the Friedman test in the analysis of ordinal-scale data in repeated measures designs," *Physiother. Res. Int.*, vol. 1, no. 4, pp. 221–228, 1996. <https://doi.org/10.1002/pri.66>
 24. M. W. Fagerland, "t-tests, non-parametric tests, and large studies—a paradox of statistical practice?," *BMC Med. Res. Methodol.*, vol. 12, no. 1, p. 78, 2012. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-12-78>

Diseño y caracterización de un tubo de impedancias con sensores acústicos de bajo costo

Jaime Ricardo González Romero¹, Adalberto Zamudio¹, Guillermo García Torales²

¹Departamento de Física, Universidad de Guadalajara, Av. Revolución No. 1500, Guadalajara, Jalisco, México

²Departamento de Electro-fotónica, Universidad de Guadalajara, Av. Revolución No. 1500, Guadalajara, Jalisco, México

Resumen: En este trabajo se presenta el diseño, construcción y caracterización de un tubo de impedancias acústicas accesible, adecuado para análisis en el rango de 20 Hz a 4 kHz. El dispositivo fue fabricado con materiales comerciales y emplea una configuración de dos sensores acústicos económicos. Se describe el desarrollo de un algoritmo para la calibración de los sensores, basado en la norma ASTM E1050-12, reemplazando el analizador de espectro por un osciloscopio digital. Las señales adquiridas en el dominio del tiempo se transforman al dominio de la frecuencia para obtener su espectro y aplicar el procedimiento de calibración. Aunque el sistema aún está en fase de validación, los resultados preliminares indican un comportamiento coherente con lo esperado teóricamente. Este desarrollo busca fomentar el uso de herramientas accesibles para la caracterización acústica de materiales en contextos educativos o de investigación aplicada.

1. Introducción

La caracterización acústica de materiales desempeña un papel fundamental en el desarrollo de nuevas tecnologías en la construcción y en la ciencia de materiales [1-3]. Su importancia radica en el desarrollo de materiales con menor impacto ambiental, y en la necesidad de mitigar la contaminación acústica, un fenómeno presente en todos los entornos urbanos e industriales, que puede causar efectos nocivos tanto físicos como psicológicos en los seres vivos [4-7]. Se han establecido métodos estandarizados de medición y calibración, como la norma ASTM E1050-12 [8] y la norma UNE-EN ISO 10534-2:2024 [9], las cuales definen procedimientos específicos para determinar la impedancia acústica, el coeficiente de absorción, o la pérdidas por transmisión mediante tubos de impedancia acústica [10-12].

Actualmente, existen en el mercado diversos sistemas para la caracterización acústica de materiales, que cumplen con las normativas internacionales y ofrecen alta precisión, como es el caso de los tubos de impedancia industriales mostrado en la Figura 1a. Sin embargo, estos equipos tienen un costo elevado y requieren de componentes adicionales para su operación, como analizadores de espectro, fuentes acústicas de banda ancha, micrófonos de alta sensibilidad o software licenciados. Estas condiciones limitan su implementación en entornos educativos o laboratorios con recursos restringidos, dificultando el acceso a prácticas experimentales.

Recibido: junio 02, 2025

Aceptado: agosto 08, 2025

autor de correspondencia:

jaimer.gonzalezr@academicos
.udg.mx

© 2025 Revista Ciencia Aplicada



Figura 1. Tubos de impedancia acústica comercial y propuesto. a) Tubo de impedancias acústicas modelo 4206 de Brüel & Kjær®. Imagen tomada del catálogo en línea del fabricante. b) Tubo de impedancias acústicas diseñado.

Para subsanar lo anterior, se describe una alternativa accesible para la implementación parcial de la norma ASTM E1050-12, mediante la construcción de un tubo de impedancias, equipado con sensores acústicos económicos y un osciloscopio como se muestra en la Figura 1b. El sistema presentado fue diseñado con materiales comercialmente disponibles, con el objetivo de ser utilizado en contextos educativos o en estudios básicos de caracterización acústica en el rango de 20 Hz a 4 kHz. Dado que el uso de este tipo de sensores implica limitaciones en su respuesta en frecuencia, se desarrolló un algoritmo de calibración que compensa dichas variaciones. El algoritmo realiza la transformación de las señales en el dominio del tiempo mediante la transformada rápida de Fourier (FFT), y aplica una corrección basada en la comparación de la respuesta en frecuencia de ambos sensores.

En este artículo, se describe primero el diseño y construcción del tubo de impedancias, los materiales empleados y su configuración general bajo las consideraciones de la norma. Posteriormente, se detalla el sistema de adquisición y el tipo de sensores utilizados, denotando las consideraciones necesarias para su calibración. La sección metodológica incluye el desarrollo del algoritmo de procesamiento de señales, desde la captura de datos temporales hasta la obtención de la respuesta espectral y su posterior compensación. Finalmente, se presentan los resultados del sistema calibrado, junto con una discusión de sus limitaciones, y se concluye con una reflexión sobre su potencial en entornos educativos y de investigación con recursos limitados.

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño del tubo de impedancias

El tubo de impedancias fue fabricado en cloruro de polivinilo (PVC) rígido, debido a su disponibilidad comercial, de bajo presupuesto y facilidad de manipulación. El diámetro interno D_i es de aproximadamente 51 mm, mientras que el externo D_e es de aproximadamente 65 mm. El tubo está dividido en dos secciones, unidas por un porta muestras de longitud $l_m = 15.6$ mm. La primera sección, P_1 , contiene la fuente

acústica y dos orificios para los sensores S_1 y S_2 . Esta configuración se utiliza tanto para la medición del coeficiente de absorción acústico como para la calibración de los sensores. La segunda sección, P_2 , aloja dos orificios más para un segundo par de sensores con la finalidad de medir las pérdidas por transmisión y un extremo intercambiable para colocar terminaciones rígidas o mitigadoras. Las longitudes de P_1 y P_2 son $L_1 = 440 \text{ mm}$ y $L_2 = 350 \text{ mm}$, respectivamente, lo cual permite cubrir el rango de frecuencias deseado y facilita la reconfiguración del sistema para distintos tipos de mediciones acústicas.

En un extremo de P_1 , se diseñó un soporte a medida para acoplar la fuente acústica al tubo. Este componente, impreso en 3D, incluye una capa intermedia de material absorbente de vibraciones de etilvinilacetato (goma EVA) de 7 mm de espesor para evitar que las vibraciones mecánicas de la bocina se transmitan directamente al tubo. La unión se realiza a presión, aplicando vaselina entre las superficies de contacto para mejorar el sellado acústico y minimizar pérdidas por fugas. En el extremo de P_2 , se utilizó un soporte impreso con características similares para permitir la instalación intercambiable de terminadores rígidos o absorbentes, asegurando también un buen sellado acústico.

La longitud total del tubo, de aproximadamente 805 mm , fue seleccionada para permitir mediciones confiables en el rango de frecuencias de trabajo del tubo. Este rango depende de la relación entre la longitud del tubo, el diámetro interno y la separación entre sensores, en función de la longitud de onda del sonido. Esta elección busca minimizar los efectos de los modos de resonancia longitudinales. La frecuencia mínima f_{min} , y la frecuencia máxima de trabajo f_{max} del tubo están dadas por

$$f_{min} > \frac{(0.01)c}{S} [\text{Hz}], \quad (1)$$

$$f_{max} < \frac{Kc}{D_i} [\text{Hz}], \quad (2)$$

donde c es la velocidad del sonido en el medio de propagación (típicamente aire, 343 m/s), S , en metros, es la distancia de separación de los micrófonos, D_i , también en metros, es el diámetro interno del tubo, y $K = 0.586$ es una constante de proporcionalidad de geometría para tubos cilíndricos.

Comúnmente, se despeja S de la ecuación (1) fijando una frecuencia mínima deseada. En este caso, para cubrir el límite inferior del rango auditivo humano (20 Hz), se obtiene, por lo tanto $S > (0.01c)f_{min}^{-1} > 0.1715 \text{ m}$. Sin embargo, f_{max} debe de calcularse con la ecuación (2) para adaptarse al tubo con el que se trabaje. En nuestro caso, $f_{max} < (0.586 * 343)(51 \times 10^{-3})^{-1} < 3.941 \text{ kHz}$.

La fuente acústica es una bocina de 50 mm de diámetro con 4 Ω de impedancia, potencia pico de 5 W y rango de respuesta entre 20 Hz y 18 kHz, montada en el soporte 3D, como se muestra en la Figura 2. La distancia l_1 , que separa la fuente acústica con el sensor S_1 , se determina para asegurar que se trabajan con ondas planas y despreciar los efectos de los bordes de la bocina mientras se reducen las reflexiones difusas o turbulentas, de la forma

$$l_1 > 3(D_i) [m], \quad (3)$$

mientras que la distancia l_2 , entre el sensor S_2 y la muestra se obtiene de la forma

$$l_2 > 0.5(D_i) [m]. \quad (4)$$

En nuestro sistema, las distancias se fijaron en $l_1 = 0.160$ m, $l_2 = 0.03$ m y $S = 0.18$ m valores elegidos por conveniencia y respetando los límites mínimos requeridos por las ecuaciones (1) a (4).

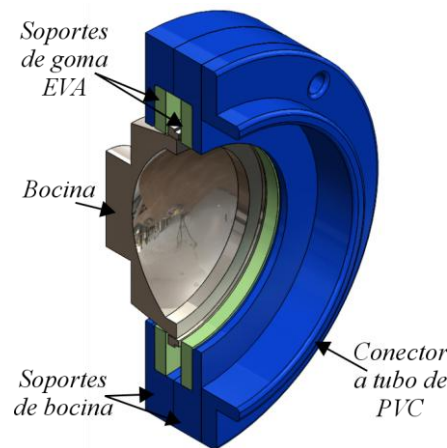


Figura 2. Detalle del montaje de la fuente acústica en el tubo mediante el soporte impreso en 3D.

El extremo de P_2 incluye una tapa intercambiable de diámetro interno igual a D_e , que permite colocar tanto un terminador rígido de aluminio (diámetro igual a D_i , espesor de 5 mm) o un terminador absorbente de espesor variable. Los orificios para sensores en la sección P_2 se encuentran a distancias similares a las de P_1 , pero dispuestos en orden inverso respecto a la dirección de propagación del sonido.

El tubo se montó sobre bases de sujeción hechas a medida e impresas en 3D, las cuales incluyen una capa de goma EVA de 2 mm de espesor que actúa como aislante para evitar el acoplamiento de vibraciones con el banco de trabajo. Asimismo, cada sensor cuenta con un soporte especial que garantiza su fijación hermética y minimiza pérdidas acústicas en los puntos de inserción.

Las dimensiones del tubo y la posición de los sensores fueron seleccionadas siguiendo las recomendaciones establecidas en la norma, a fin de garantizar que el

sistema opere dentro de los límites adecuados para la caracterización de materiales absorbentes en el rango de interés. En particular, la separación entre sensores, la ubicación de las terminaciones y la longitud total del tubo fueron definidas para minimizar errores asociados a la interferencia de modos estacionarios, efectos de borde y asegurarse que se trabaja con ondas planas.

Todas las piezas impresas en 3D fueron fabricadas en polietileno tereftalato de glicol (PET-G), de la marca Protej®, en colores blanco y negro. Se utilizó una densidad de relleno del 30%, con patrón tipo panal, y tres paredes tanto internas como externas. La Figura 3a muestra un esquema ilustrativo del sistema completo, mientras que en la Figura 3b se detallan las dimensiones de la sección P1.

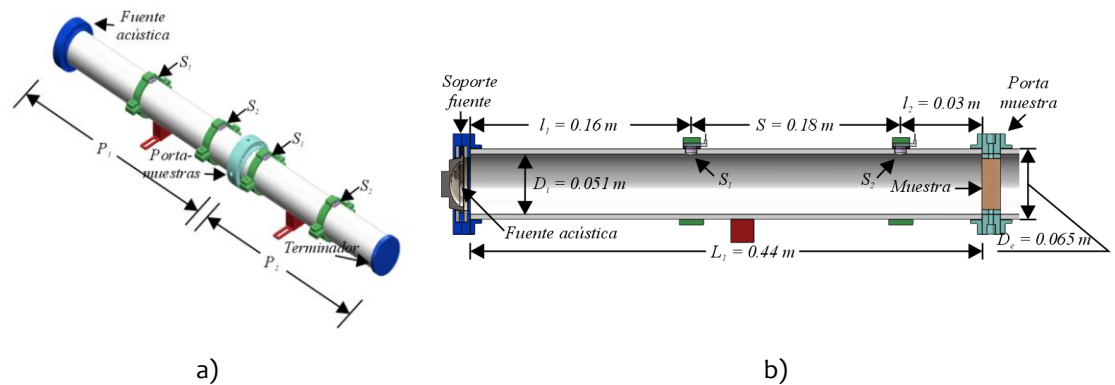


Figura 3. Diagrama y vista a detalle del tubo de impedancia. a) Esquema del tubo. El diseño modular del sistema permite su configuración según los requerimientos de la medición. b) Dimensiones de P1. Se muestran los diámetros D_i y D_e , la ubicación del barreno S_1 y S_2 , la longitud entre fuente y sensor l_1 , la longitud de separación entre sensores S , y la longitud entre el segundo sensor y la muestra l_2 .

2.2 Sensores acústicos y calibración

Para la adquisición de la señal acústica en el tubo se emplearon dos micrófonos omnidireccionales de condensador electret, modelo BCM9765P-44, con respuesta nominal en el rango de 20 Hz a 16 kHz. Cada micrófono se acopló a un preamplificador MAX4466, con ganancia ajustable hasta 20 dB y alimentación de 5 V DC. La elección de estos componentes se basó en su disponibilidad comercial, fácil obtención y simplicidad de integración, resultando adecuado para aplicaciones experimentales y educativas en el rango audible.

Los sensores se insertaron en los orificios S_1 y S_2 de las secciones P_1 y P_2 , con un diámetro aproximado de 10 mm, correspondiente a la carcasa metálica del micrófono. Para garantizar un sellado acústico, se empleó una junta tórica (o-ring) de 9 mm de diámetro interno y 2 mm de espesor, colocada entre el cuerpo del sensor, la placa de circuito y el tubo. Se utilizó vaselina comercial como material de sellado reduciendo así holgura asociadas a las tolerancias mecánicas. Finalmente, se

diseñaron soportes impresos en 3D que permitieron un montaje preciso y hermético de los sensores, como se muestra en el esquemático de la Figura 4.

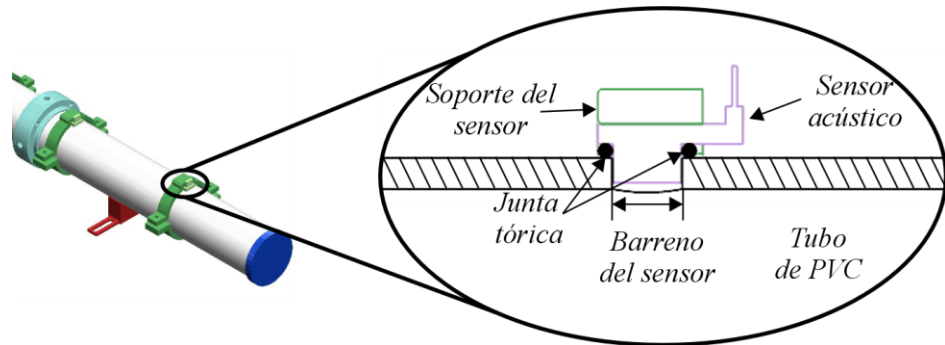


Figura 4. Detalle del montaje del sensor acústico en el tubo. Una junta tórica de 9 mm de diámetro interno y 2 mm de espesor entre el cuerpo del sensor, la placa de circuito y el tubo, asegura el sellado acústico en los puntos de inserción. Los sensores se montaron sobre soportes impresos en 3D, diseñados para garantizar un ensamblaje hermético.

2.3 Sistema de adquisición y fuente acústica

La señal acústica proveniente de los sensores fue adquirida mediante un osciloscopio digital Siglent® SDS 1204CFL, 200 MHz, 2 GSa/s, empleando captura única sincronizada al flanco de subida del pico máximo de la señal generada. Se utilizó una ventana de tiempo de 180 ms, suficiente para cubrir un barrido completo en frecuencia desde 20 Hz hasta 4 kHz, registrando de manera simultánea las señales de ambos sensores. No se aplicaron filtros digitales ni promedios, aunque se utilizó acoplamiento en AC en las sondas de medición para eliminar el *offset* intrínseco de los micrófonos.

Las señales obtenidas en el dominio temporal se procesan posteriormente mediante un algoritmo propio, el cual realiza la FFT sobre ambas señales, calcula su relación espectral compleja y compensa posibles diferencias de fase y amplitud. El resultado es una función de transferencia que permite calibrar uno de los sensores respecto al otro, como lo exige la norma.

La señal de prueba fue generada mediante un generador de funciones Unit-T® UTG392E, 60MHz, 200 MSa/s configurado en modo de barrido logarítmico de 180 ms. Se utilizó una señal senoidal con un rango de frecuencia de 20 Hz a 4 kHz y una amplitud de 250 mV pico a pico, suficiente para evitar la saturación de los preamplificadores en el pico de respuesta frecuencial máximo del tubo.

2.4 Algoritmo de calibración

La norma establece un procedimiento para la calibración de sistemas con dos micrófonos montados en las paredes de un tubo. Uno de los requisitos fundamentales es la compensación relativa entre ambos sensores, es decir, la

determinación de su sensibilidad espectral individual, incluso cuando son del mismo modelo. Esto se debe a que, por diferencias en las posiciones relativas y tolerancias mecánicas, los sensores no presentan una respuesta espectral idéntica, haciendo imprescindible el proceso de calibración.

En equipos comerciales, este procedimiento suele integrarse mediante analizadores de espectro, sistemas embebidos y software especializado que transforma automáticamente las señales del dominio temporal al espectral, obteniendo su fase y magnitud en función de la frecuencia. Estos sistemas permiten calibrar los sensores “con un clic”, lo que representa una ventaja operativa, aunque a un costo considerable. Esta situación abre oportunidades para propuestas basadas en herramientas accesibles y económicas.

En este trabajo, el registro de señales se realiza en el dominio temporal mediante un osciloscopio, y el procesamiento posterior se lleva a cabo en MATLAB® para cumplir con los requisitos establecidos por la norma. No se emplea la función FFT incorporada en el osciloscopio debido a su baja resolución espectral en el rango audible.

A modo de resumen, la Figura 5 presenta un diagrama del proceso de calibración según lo establecido en la norma. El primer paso consiste en medir el nivel de presión sonora (SPL) con la fuente acústica encendida y apagada, utilizando un terminador absorbente en el extremo de P1. Esto permite calcular la relación señal a ruido (SNR) de los micrófonos. Las mediciones deben promediarse para reducir la incertidumbre.

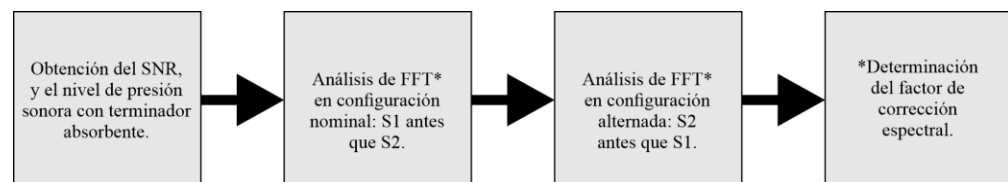


Figura 5. Diagrama del proceso de calibración según la norma ASTM E1050-12. Se especifica con un asterisco en cuál parte del procedimiento se reemplaza la norma con el algoritmo propuesto.

En el segundo paso, se analiza la señal en el dominio de la frecuencia mediante una FFT utilizando una ventana Hanning, bajo condiciones idénticas para ambos sensores. Este es el punto que es reemplazado más adelante con el algoritmo desarrollado, que procesa la señal adquirida por el osciloscopio y calcula su espectro.

El tercer paso, se mide la función de transferencia compleja para cada sensor en dos configuraciones diferentes, *I* e *II*, comenzando con su configuración estándar *I* (*S*₁ en el orificio *S*₁, *S*₂ en el orificio *S*₂). Esta función de transferencia se expresa como:

$$\bar{H}^I = |\bar{H}^I|e^{j\bar{\phi}^I} = \bar{H}_r^I + j\bar{H}_i^I, \quad (5)$$

donde \bar{H}_r^I y $j\bar{H}_i^I$ representan las partes real e imaginaria, respectivamente, de la respuesta espectral de la configuración I . A partir del siguiente paso, los procedimientos descritos se complementan mediante el algoritmo propuesto.

Como cuarto paso, se intercambian las posiciones de los sensores (S_2 en el orificio S_1 y S_1 en el orificio S_2) para obtener una segunda función de transferencia, denotada como:

$$\bar{H}^{II} = |\bar{H}^{II}|e^{j\bar{\phi}^{II}} = \bar{H}_r^{II} + j\bar{H}_i^{II}. \quad (6)$$

Finalmente, se determina el factor complejo de corrección espectral \bar{H}_c , que representa la diferencia en magnitud y fase entre ambos sensores. Este factor se calcula a partir del producto de las funciones de transferencia obtenidas en ambas configuraciones, según:

$$\bar{H}_c = \sqrt{(\bar{H}^I \times \bar{H}^{II})} = |\bar{H}_c|e^{j\bar{\phi}_c}. \quad (7)$$

Este factor permite compensar las discrepancias de fase y amplitud entre los sensores, asegurando así la validez de las mediciones posteriores de impedancia acústica conforme a lo exigido por la norma.

En la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo del método propuesto. Este se divide en tres partes principales: parte 1, inicialización del entorno y carga de archivos; parte 2, aplicación de la FFT y promediado de señales; y parte 3, cálculo del factor de corrección espectral complejo \bar{H}_c así como la generación de gráficas comparativas.

La primera parte corresponde a la carga de los archivos provenientes del osciloscopio, a los cuales previamente se les ha eliminado el encabezado y ajustado el vector de tiempo para que inicie en cero. Esta modificación es necesaria debido a que el osciloscopio inicia su conteo de tiempo en cero en el momento del disparo (es decir, cuando detecta el pico máximo de amplitud de la señal), y no necesariamente cuando la fuente acústica comienza a emitir a 20 Hz. En esta etapa también se inicializan las celdas que almacenarán los vectores de tiempo, las señales registradas y la nomenclatura asociada a las posiciones de los sensores. Finalmente, se calcula de forma automática la frecuencia de muestreo, el número total de muestras y el vector de frecuencias correspondiente.

En la segunda parte, se aplica la FFT a cada una de las señales obtenidas en las dos posiciones de los dos sensores. También se elimina la componente DC (valor medio) de las señales y se compensa la amplitud. Luego, se realiza el promediado de las 10 señales obtenidas, agrupándolas por sensor y posición. Las combinaciones resultantes son: H11 (sensor 1 en posición del sensor 1), H12 (sensor 1 en posición

del sensor 2), H21 (sensor 2 en posición del sensor 1) y H22 (sensor 2 en posición del sensor 2). En esta fase, el usuario puede decidir si se requiere la generación de gráficas de magnitud y fase de las señales promediadas, con fines de análisis.

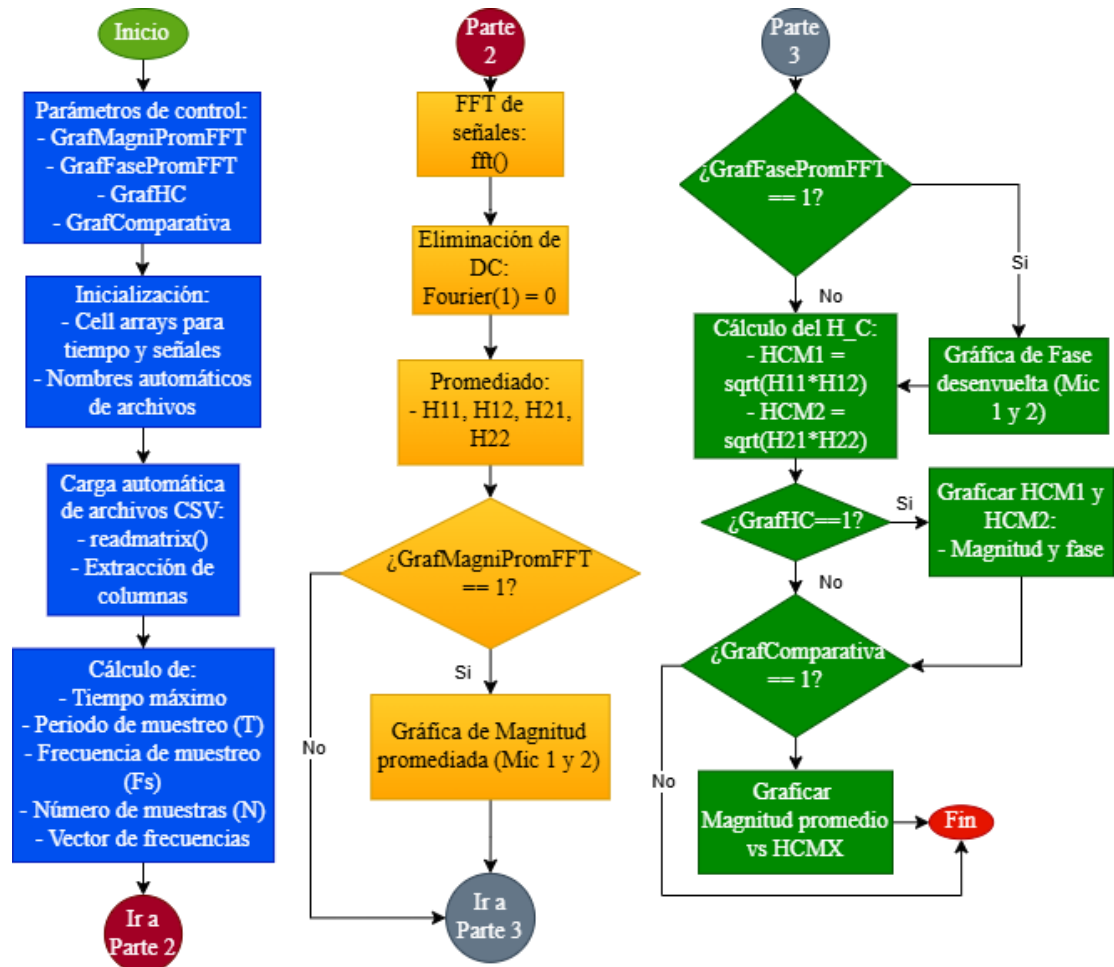


Figura 6. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto para el procesamiento de señales acústicas. El proceso se divide en tres partes: carga e inicialización, análisis espectral, y cálculo del factor de corrección.

Finalmente, en la tercera parte se calcula el factor complejo de corrección espectral \bar{H}_c , y se ofrece la opción de graficar su magnitud y fase, así como una comparación visual entre este factor y las señales promediadas.

Si bien se han respetado los principios fundamentales del método de dos micrófonos descrito en la norma, se introdujeron modificaciones sustanciales en los procesos de adquisición y procesamiento de datos. Entre ellas destacan el uso de sensores económicos, la sustitución del analizador de espectro por un osciloscopio, y el desarrollo de un algoritmo que aplica la FFT para obtener el factor complejo de corrección espectral. Con ello, el sistema queda listo para iniciar el análisis acústico

de materiales. Estas modificaciones fueron implementadas con el objetivo de establecer una metodología de calibración funcional, reproducible y accesible.

3. Resultados

Se procesaron diez señales adquiridas en cada configuración sensor/posición. En la Figura 7 se muestran un subconjunto de estas señales (tres por configuración) y sus respectivos promedios, clasificados por la nomenclatura $SXYZ$, donde SX indica el sensor utilizado ($S1$ o $S2$), Y la posición del sensor (1 o 2), y Z el número de experimento. Para no saturar la imagen, únicamente se graficaron los primeros tres experimentos por configuración. Todas las señales mostraron comportamientos coherentes tanto en magnitud (Figura 6a) como en fase (Figura 6b), lo que confirma la repetibilidad del sistema y la estabilidad de la adquisición.

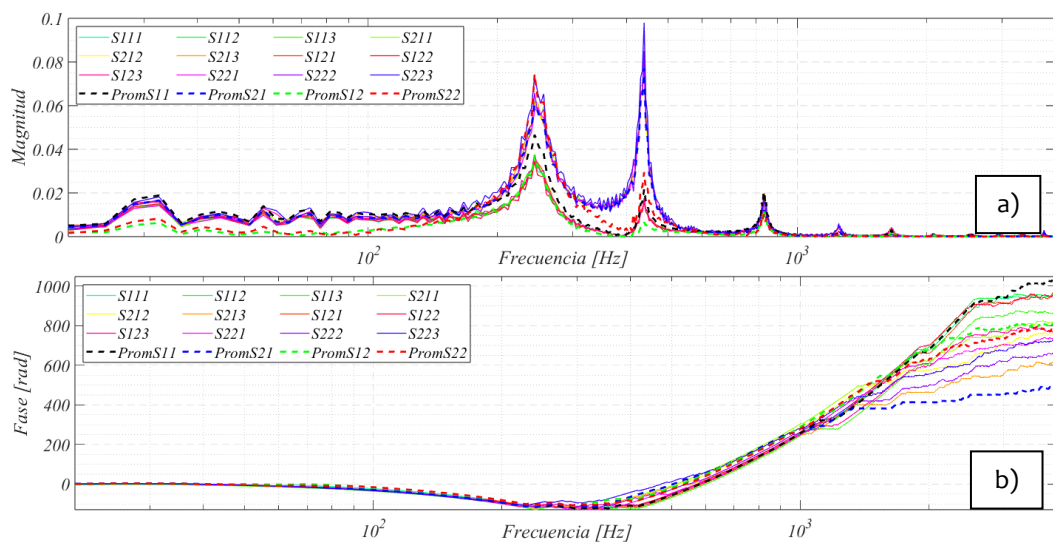


Figura 7. Subconjunto de señales adquiridas en distintas configuraciones de sensor y posición ($S1$ y $S2$ en posiciones 1 y 2). a) Magnitud. b) Fase. Se observan tres repeticiones por configuración, junto con su promedio correspondiente. Las señales se expresan en función de la frecuencia.

Sin embargo, como se observa en la Figura 7a, el tubo de impedancias presenta dos armónicos dominantes, aproximadamente en 244 Hz y 439 Hz, lo que indica su rango operativo principal. A partir de estas frecuencias, la magnitud de la respuesta disminuye de forma notable en altas frecuencias, en concordancia con lo reportado en la literatura. También se aprecia una diferencia en la magnitud de las señales promediadas según la posición del sensor: para un mismo sensor, las respuestas son muy similares entre posiciones, salvo en las bajas frecuencias, donde se detecta una ligera variación.

En contraste, como se observa en la Figura 7b, las diferencias de fase entre posiciones se vuelven más marcadas conforme aumenta la frecuencia. Este desfase entre señales, tanto en magnitud como en fase, es compensado parcialmente

mediante el cálculo del factor complejo de corrección, utilizado en la caracterización acústica de materiales. Aquellos efectos que no son corregidos por \bar{H}_c definen los límites operativos del tubo.

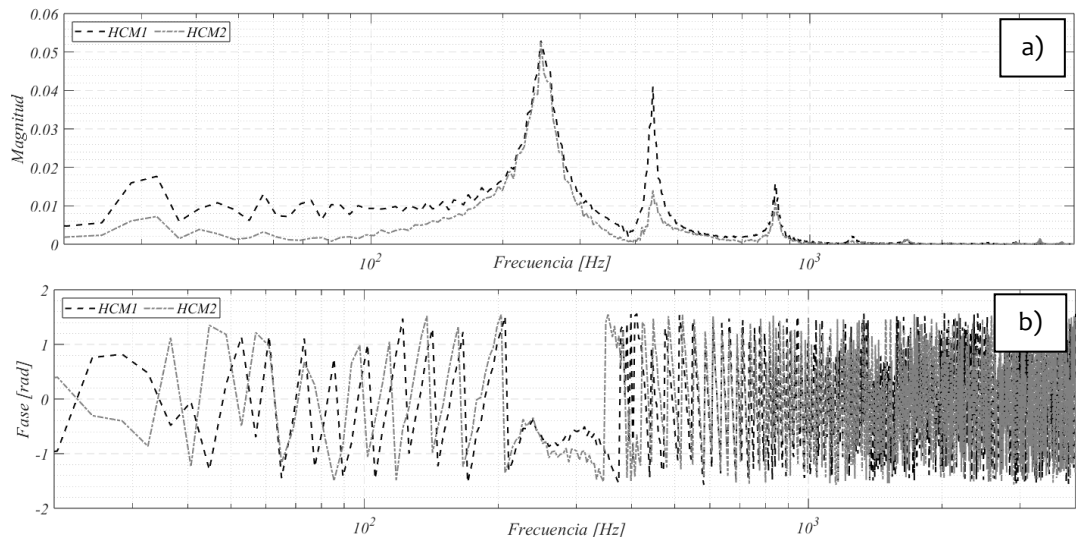


Figura 8. Factor complejo de corrección \bar{H}_c calculado mediante los métodos de promediado HCM1 mostrado como la línea negra de guiones, y HCM2 en línea gris de guiones y puntos. a) Magnitud de \bar{H}_c . b) Fase de \bar{H}_c . Los resultados determinan la banda útil del sistema entre 30 Hz y 1500 Hz, donde se mantiene la estabilidad y coherencia espectral.

En la Figura 8a se muestra la magnitud, y en la figura 8b la fase de \bar{H}_c , calculado a partir de las combinaciones de sensores y posiciones. Se presentan dos curvas, correspondientes a los dos métodos de promediados empleados: HCM1 (verde) y HCM2 (azul).

En la magnitud de \bar{H}_c , se identifican claramente dos armónicos dominantes, centrados en aproximadamente 244 Hz y 439 Hz, consistentes con el comportamiento resonante observado previamente en las señales individuales. Fuera de estas frecuencias, la magnitud de \bar{H}_c disminuye drásticamente, lo cual indica una menor sensibilidad del tubo en rangos superiores y establece el límite superior operativo del sistema. En las regiones bajas (< 100 Hz), la magnitud es relativamente pequeña lo que se le atribuye a la sensibilidad de la fuente acústica. Por otro lado, en las regiones altas (>1 kHz) la magnitud es baja y relativamente ruidosa, lo que podría atribuirse a una menor relación señal/ruido y a interferencias en la medición o respuesta frecuencial de los sensores.

Respecto a la fase, se observa un comportamiento relativamente estable y coherente, con pendientes negativas y positivas secuenciales. Sin embargo, aunque la fase comienza a mostrar oscilaciones rápidas y dispersión, particularmente por encima de 1 kHz, se mantienen el mismo comportamiento. Por otro lado, las

pendientes de la fase a partir de 1 kHz son más planas, lo cual indica un menor disturbio de la fase en las altas frecuencias.

En conjunto, los resultados obtenidos para \bar{H}_c permiten definir una banda útil de operación del tubo entre aproximadamente 30 Hz y 1500 Hz, dentro de la cual tanto la magnitud como la fase del factor presentan estabilidad y coherencia suficientes para realizar mediciones confiables.

4. Conclusiones

El análisis de las señales revela que el tubo de impedancias opera de forma consistente con lo esperado en frecuencias bajas, con una respuesta estable y repetible. Sin embargo, a partir de los 1.5 kHz se incrementan los errores debido a la dispersión de fase y a la disminución de la relación señal/ruido, lo cual sugiere interpretar los resultados con cautela en ese rango.

Si bien el sistema es operativo hasta aproximadamente 4 kHz, su utilización más confiable se encuentra en frecuencias inferiores, donde la respuesta es más estable y precisa. Para mitigar estas limitaciones, se plantea emplear un tubo metálico y un sistema de sujeción más robusto, que permitan modificar las condiciones de resonancia y mejorar la estabilidad en frecuencias altas. A pesar de estas restricciones, la propuesta cumple su objetivo como una herramienta accesible, reproducible y económico, adecuada para aplicaciones educativas y experimentales en la caracterización acústica de materiales.

Agradecimientos

R.G.R. expresa su agradecimiento a la Universidad de Guadalajara por el respaldo institucional brindado para la realización de este trabajo, así como a Miriam Y. Arriaga por su valiosa guía y orientación durante el desarrollo e implementación del proyecto.

Referencias

1. H. Ge et al., "Breaking the barriers: advances in acoustic functional materials," *National Science Review*, vol. 5, no. 2, pp. 159–182, 2018.
2. V. Desarnaulds, E. Costanzo, A. Carvalho, and B. Arlaud, "Sustainability of acoustic materials and acoustic characterization of sustainable materials," in *Proceedings of the 12th international congress on sound and vibration*, 2005.
3. N. Hemmati et al., "Acoustic and thermal performance of wood strands-rock wool-cement composite boards as eco-friendly construction materials," *Construction and Building Materials*, vol. 445, p. 137935, 2024.
4. H. S. Seddeq, "Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials," *Australian journal of basic and applied sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 4610–4617, 2009.
5. M. Caniato, L. Cozzarini, C. Schmid, and A. Gasparella, "Acoustic and thermal characterization of a novel sustainable material incorporating recycled microplastic waste," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 28, pp. 1–12, 2021.

6. S. Geravandi et al., "Noise pollution and health effects," *Jundishapur Journal of Health Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1-5, 2015.
7. T. Münzel, M. Sørensen, and A. Daiber, "Transportation noise pollution and cardiovascular disease," *Nature Reviews Cardiology*, vol. 18, no. 9, pp. 619–636, 2021.
8. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System, *ASTM E1050-12*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, Nov. 13, 2019.
9. Acoustics - Determination of acoustic properties in impedance tubes - Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance (ISO 10534-2:2023), *UNE-EN ISO 10534-2:2024*, Asociación Española de Normalización, Madrid, Spain, April, 2024.
10. N. Hiremath, V. Kumar, N. Motahari, and D. Shukla, "An Overview of Acoustic Impedance Measurement Techniques and Future Prospects," *Metrology*, vol. 1, no. 1, pp. 17–38, 2021.
11. S. Bousshine, M. Ouakarrouch, A. Bybi, N. Laaroussi, M. Garoum, and A. Tilioua, "Acoustical and thermal characterization of sustainable materials derived from vegetable, agricultural, and animal fibers," *Applied Acoustics*, vol. 187, p. 108520, 2022.
12. X. Liu, X. Xiong, J. Pang, L. Wu, and H. Zhang, "Airflow resistivity measurement and sound absorption performance analysis of sound-absorb cotton," *Applied Acoustics*, vol. 179, p. 108060, 2021.

Análisis y Modelado de la Distribución Térmica en Morteros

Omar Aguilar Loreto¹, Juan José Ávila Navarrete², Abimael Jiménez Pérez³

¹Departamento de Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional 151, Autlán, 48900 Jalisco, México

²Estudiante del Doctorado POCIMA, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional 151, Autlán, 48900 Jalisco, México

³Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. De Charro 450, Juárez, Chihuahua, México

Resumen: El estudio del calor y su propagación en distintos materiales es de gran interés en el campo de las ciencias físicas y las ingenierías. Entre la amplia variedad de materiales desarrollados, el estudio de materiales con base cementantes es un área vigente. En este artículo se caracteriza un cubo de mortero de forma cuasi perfecta, analizando la distribución de temperaturas que adquiere bajo la acción de una fuente de calor constante en estado estacionario. Asimismo, se desarrolla un modelo matemático que incorpora las condiciones iniciales y de frontera. Los datos obtenidos a partir del modelo son comparados con los resultados obtenidos del experimento térmico. A partir del modelado y la experimentación, se determina el valor de la difusividad térmica del mortero estudiado. Esta medición permitió comprobar que el modelo propuesto describe adecuadamente los resultados del desarrollo experimental.

1. Introducción

El calor y su evolución en la materia, especialmente en los sólidos, ha sido estudiado desde hace siglos. Sin embargo, hacia finales del siglo XVIII, Joseph Fourier fue uno de los pioneros en analizar de manera sistemática el fenómeno de la propagación del calor, utilizando métodos matemáticos avanzados para su época [1,2]. Estos métodos siguen utilizándose en la actualidad y han proporcionado las bases para la medición de las cantidades fundamentales en termodinámica [3]. Es muy importante el estudio de los procesos de transferencia de calor, pues en la actualidad existen sistemas que se ven limitados en su funcionamiento por la generación de calor, aún continúa el estudio de contenedores adecuados para almacenar dispositivos o componentes para los cuales es imprescindible la disipación del calor [4].

En este contexto, los materiales de construcción, como el mortero, ofrecen una oportunidad idónea para estudiar fenómenos físicos complejos bajo condiciones delimitadas, considerando al calor como una de las características sobresalientes a analizar. El mortero, compuesto por una matriz cementante y agregados finos, se caracteriza por ser un sistema multiparamétrico en el que intervienen procesos térmicos y mecánicos, susceptibles de ser modelados mediante métodos matemáticos y computacionales [5]. Su uso generalizado, tanto en aplicaciones estructurales como no estructurales, junto con su disponibilidad y bajo costo, lo

Primer Volumen

Recibido: julio 8, 2025

Aceptado: agosto 16, 2025

autor de correspondencia:

omar.aguilar@academicos.udg.mx

© 2025 Revista Ciencia Aplicada

convierten en un candidato viable para simular y analizar la evolución del calor [6]. El estudio del calor en mortero, permite explorar fenómenos asociados al comportamiento de materiales cementantes, ayuda a simular la distribución de temperaturas en los diseños de construcción modernos, los cuales exigen valores de temperatura adecuados para el ser humano [7]. También constituye un medio práctico y representativo para validar modelos físicos aplicables a sistemas más complejos.

Aunado a ello, resulta bastante útil reproducir un fenómeno de forma controlada. La mayoría de las veces no es posible estudiarlo de manera directa, ya que depende de varios factores sobre los cuales no se puede tener control, y que en ocasiones quedan fuera del alcance del experimentador [8]. Tales factores pueden ser de índole económica, involucrar materiales aún no explorados, requerir condiciones ideales que no se presentan cotidianamente, o implicar la falta de muestras específicas, entre otros. Por estas razones, el científico se ve obligado a reproducir los fenómenos bajo condiciones restringidas. Con el desarrollo de la tecnología, hoy en día existen diversos recursos para lograrlo, como computadoras y software especializado [9,10].

En situaciones como las anteriormente descritas, es preciso y necesario recurrir al concepto de modelación [8,11,12]. La modelación permite reproducir un fenómeno físico que no puede ser estudiado de forma directa. Desde luego, siempre representa una aproximación a la situación real. No obstante, aun cuando el modelo se encuentre sustentado por la lógica y sea consistente matemáticamente con los modelos aceptados en la época contemporánea, la experimentación sigue siendo el criterio que determina su validez [13–15]. Ejemplos notables de este esquema, en particular en la Física [16] incluyen la predicción de la antimateria a partir de las ecuaciones de Dirac [17], las ondas gravitacionales [18] o el bosón de Higgs [19].

El análisis previo permite sintetizar la relación fundamental que existe entre cualquier modelo teórico y el comportamiento de la naturaleza en la siguiente formulación:

Teoría ↔ Realidad Experimental

El estudio del mortero constituye un medio práctico y representativo para validar modelos físicos aplicables a sistemas más complejos. En algunos casos, como en el artículo [20] se muestra una metodología de la solución de la ecuación del calor para encontrar la distribución de calor en barras de diferentes materiales como cobre, níquel, oro y aluminio, presentando sus principales características para la aplicación del modelo. Los modelos matemáticos para describir la distribución de calor alrededor de los bordes exteriores de un molde para hornear se presentan en el artículo [21], donde se aplica la ley de Fourier, para diseñar modelos matemáticos de la distribución de calor mediante simulación y mostrar la efectividad de los métodos aplicados. En [22] se diseña y se construye un sistema electromecánico

para el estudio de la ecuación del calor en una barra horizontal. Al mismo tiempo, se resuelve la ecuación del calor, incorporando las condiciones correspondientes del diseño experimental a fin de corroborar y sustentar el modelo. A pesar del gran avance obtenido mostrado anteriormente, no se ha contemplado un esquema de medición a bajo costo que ofrezca resultados aceptables, ni se ha contrastado el modelo teórico con la implementación del experimento para un material de tipo mortero, mismos que se exponen en esta investigación.

En este artículo se desarrolla el modelo matemático para la distribución del calor para un sólido con geometría cúbica, compuesto de mortero convencional. A partir del experimento se determinan los valores de temperatura en sus caras al someterlo a una fuente de calor homogénea, y se analiza su evolución hasta alcanzar el equilibrio termodinámico. El modelo propuesto correspondiente a la ecuación del calor, considerando las características mencionadas anteriormente, se compara con la implementación del experimento. Se determina la constante de difusividad térmica para la mezcla de mortero a fin de validar tanto el modelo como el desarrollo experimental.

En la siguiente sección, se aborda el marco teórico aceptado y se estudia la distribución de temperaturas utilizando la Teoría del Calor desarrollada originalmente por Fourier. En la sección 3 se presenta el diseño experimental con el que se midió la temperatura del sólido compuesto de mortero. Los resultados obtenidos se muestran en la sección 4 donde el modelo se compara con la evidencia experimental. Finalmente, en la sección 5 las conclusiones se exponen con posibilidades de trabajo a futuro.

2. Modelo Teórico del Calor

La capacidad calorífica (C) es una medida de la resistencia de un cuerpo a incrementar su temperatura cuando se le suministra calor. Sin embargo, es importante distinguir entre los conceptos de temperatura y calor. El calor es una forma de energía térmica, mientras que la temperatura es una medida macroscópica relacionada con la cantidad de energía térmica acumulada en un cuerpo [22,23]. En virtud de esto, la capacidad calorífica puede definirse como $C = \frac{e}{u}$, donde e representa la cantidad de energía térmica (en Joules) y u corresponde a la temperatura (en Kelvin), de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI). Asimismo, la capacidad calorífica depende de la cantidad de masa del cuerpo al que se le suministra calor.

A partir de esto, surge el concepto de calor específico, que es la capacidad calorífica por unidad de masa (en kg) $c = \frac{C}{m}$, donde C es la capacidad calorífica y m la masa del cuerpo. El calor específico depende en gran medida de la constitución del material por lo que puede ser modelado como una función escalar que varía según la posición dentro del volumen que ocupa el objeto, es decir, $c(\vec{x})$ con $\vec{x} =$

(x, y, z) en coordenadas cartesianas [24,25]; depende a su vez, de la cantidad de masa almacenada en ese mismo volumen, de aquí el concepto de densidad de masa, $\rho = \frac{m}{V}$, donde m es la distribución de masa en el volumen V considerado [23]. La densidad puede variar dentro del objeto si la distribución de masa no es uniforme, por lo que puede modelarse como una función escalar de la posición $\rho(\vec{x})$. En ese caso, la masa contenida en un volumen específico puede expresarse como $m(\vec{x}) = \rho(\vec{x})V$. Al unir los aspectos anteriores se puede deducir que la Capacidad Calorífica es $C(\vec{x}) = c(\vec{x})\rho(\vec{x})V$.

El modelo clásico para el estudio del calor se atribuye originalmente a los trabajos realizados por Joseph Fourier, el cual representó un enfoque distinto para abordar el tema [1,3,26]. La necesidad de estudiar ciertos objetos metálicos que han sido calentados y que, por lo tanto, presentan una dinámica en la distribución y disipación del calor marcó una pauta para el desarrollo de nuevos métodos matemáticos para la modelación del problema. En particular, se avanzó significativamente en la teoría de ecuaciones en derivadas parciales y en la noción de cálculo en varias variables. No obstante, independientemente de la solidez del modelo, los principios de la física establecen la dirección a seguir para su desarrollo y validación [16-23].

La dinámica de la energía térmica puede analizarse al estudiar la cantidad de calor presente en un cuerpo, así como sus aportaciones internas y externas. Para ello, son indispensables dos elementos fundamentales. En primer lugar, es necesario preservar el principio universal de conservación de la energía; es decir, los cambios en la cantidad de calor se deben al flujo de calor, tanto interno como externo, además de las posibles fuentes de calor existentes dentro del volumen que delimita el cuerpo en estudio. En segundo lugar, se requiere considerar la ley del flujo de calor de Fourier, enunciada hacia 1822, esta ley establece que la conducción de calor a través de objetos metálicos bidimensionales es proporcional al negativo del gradiente de temperatura $\vec{\varphi}(\vec{x}, t) = -K_0(\vec{x})\vec{\nabla}u(\vec{x}, t)$, donde la constante K_0 se conoce como conductividad térmica y puede depender del material. En este trabajo, consideraremos que dicha constante es uniforme. A partir de estos razonamientos, se deduce la ecuación que describe, de forma global, las características antes mencionadas [23,24].

2.1 Ecuación del Calor

Al tener en cuenta las ideas desarrolladas en la sección anterior se puede llegar a la deducción de la ecuación

$$c(\vec{x})\rho(\vec{x})\frac{\partial u(\vec{x}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (K_0(\vec{x})\vec{\nabla}u(\vec{x}, t)) + Q(\vec{x}, t) \quad (1)$$

que es la forma más general de la Ecuación del Calor [23-25].

Para nuestro caso de estudio podemos considerar que el material es homogéneo e isótropo por lo que la densidad de masa, el calor específico y la conductividad del mismo son uniformes. También consideramos que no existen fuentes de calor al interior del cuerpo, es decir, $Q(\vec{x}, t) = 0$ de esta forma la ecuación del calor se expresa como

$$\frac{\partial u(\vec{x}, t)}{\partial t} = \alpha \nabla^2 u(\vec{x}, t). \quad (2)$$

donde $\alpha = \frac{K_0}{c\rho}$ se conoce como la Difusividad Térmica del material. La función $u(\vec{x}, t)$ describe la distribución de temperatura como una magnitud física, macroscópicamente medible y que depende de la posición espacial y del tiempo.

Usando los métodos de la física-matemática se puede encontrar la solución a la ecuación (2), donde hemos considerado un sólido cúbico de lado L , es decir la región de estudio está definida en la forma $V = \{\vec{x} \in R / 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq L, 0 \leq z \leq L\}$ y cuyas caras se encuentran a una temperatura inicial T_0 . Las restricciones en las caras del cubo se conocen como condiciones de frontera y toman la forma

$$\begin{aligned} u(0, y, z, t) &= T_0 & u(L, y, z, t) &= T_0 & u(x, 0, z, t) &= T_0 \\ u(0, L, z, t) &= T_0 & u(x, y, 0, t) &= T_0 & u(x, y, L, t) &= T_0 \end{aligned} \quad (3)$$

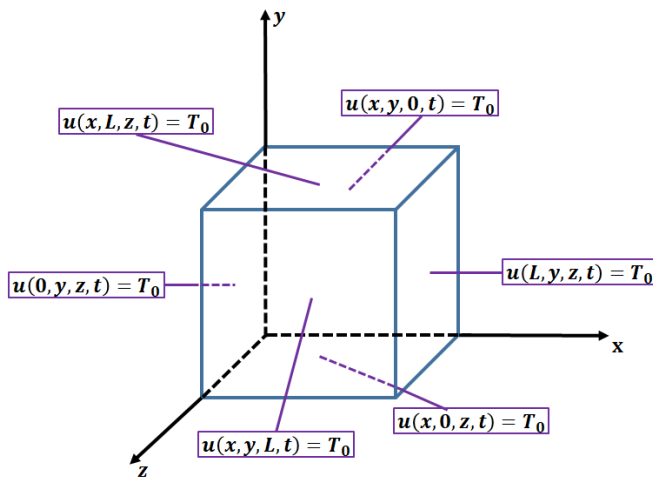


Figura 1. Un cubo ideal de mortero con las seis caras sometidas a la misma temperatura constante T_0 .

Gráficamente podemos imaginar esta situación como se presenta en la figura 1. Para encontrar una solución, proponemos que dicha solución tenga la forma $u(\vec{x}, t) = v(\vec{x}, t) + g(\vec{x})$ donde $g(\vec{x})$ representa la distribución de temperatura en el caso estacionario, $u(\vec{x}, t)$ es la función de temperatura que satisface las condiciones (3) y la función $v(\vec{x}, t)$ satisface las condiciones para el caso homogéneo cuya solución está dada como [23-27]

$$v(x, y, z, t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{nlm} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{l\pi y}{L}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi z}{L}\right) \times e^{-(l^2+m^2+n^2)\frac{\alpha\pi^2}{L^2}t} \quad (4)$$

Y los coeficientes son

$$A_{nlm} = \int_0^L \int_0^L \int_0^L [f(x, y, z) - g(x, y, z)] \times \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{l\pi y}{L}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi z}{L}\right) dx dy dz. \quad (5)$$

2.2 Un cubo de mortero inicialmente a temperatura constante

Para el caso de un cubo cuasi-perfecto de mortero podemos hacer una idealización de acuerdo a la técnica utilizada para realizar la medición de la temperatura. Se puede tomar un caso especial de la solución $u(\vec{x}, t)$ descrita en la sección anterior, considerando las siguientes restricciones:

El cubo se somete a un baño de calor hasta llegar a una temperatura T_1 donde hemos supuesto que la exposición al calor calienta de manera completamente uniforme a todo el cubo material, por lo tanto las caras del mismo mantienen la misma temperatura en un instante de tiempo dado.

Las caras del cubo para el caso estacionario no se mantienen aisladas, esto es, se mantienen a la temperatura ambiente del lugar donde se realiza la medición y que designaremos por T_0 , esto corresponde a las condiciones de frontera del cubo con una temperatura estacionaria constante y uniforme a lo largo de cada cara del cubo.

En este caso, se puede considerar sin pérdida de información para el análisis, sólo una de las caras por la simetría de la exposición y junto con lo señalado en el párrafo anterior.

Si se registra la temperatura justo en el centro de alguna de las caras, esta será la que se tome como referencia y se puede llevar la descripción cuantitativa de la solución a la forma unidimensional para simplificar el análisis.

Considerando la idealización previa, y realizado los cálculos pertinentes se deduce la solución para el caso unidimensional quedando de la siguiente manera

$$u(x, t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) e^{-(n^2)\frac{\alpha\pi^2}{L^2}t} \quad (6)$$

donde las condiciones de frontera e iniciales coinciden con las desarrolladas en el experimento, esto es, $T_0 = 32^\circ\text{C}$ es la temperatura en equilibrio con el medio ambiente, $T_1 = 90^\circ\text{C}$ es la temperatura inicial a la que fue calentado el cubo sólido,

α es la constante de difusividad térmica que se ha tomado con valor de $18 \times 10^{-6} m^2/min$, la longitud del cubo es de $L = 0.05m$ y

$$A_n = 2(T_1 - T_0) \left(\frac{1 - \cos(n\pi)}{n\pi} \right) \quad (7)$$

Observemos que la solución es una serie infinita de armónicos que atenuados por una exponencial decreciente en el tiempo, comportamiento que coincide con la segunda ley de la termodinámica en la cual el calor fluye de los objetos más calientes a objetos más fríos. Esta serie converge a la solución ideal. No obstante, para la realización de las gráficas se ha expandido la serie hasta un valor suficiente de $n=200$, donde el error de convergencia de la serie ya no es apreciable.

3. Diseño Experimental

Para la realización del experimento se ha requerido de equipo de bajo costo y el procedimiento de medición se ha desarrollado con la mayor precisión lo cual ha logrado resultados satisfactorios que se reflejan en la sección 4. A continuación se describe de manera concisa y detallada la implementación del experimento.

3.1 Elaboración del mortero

La preparación del mortero se realizó conforme a la norma ASTM C109/C109M-21, la cual define un protocolo estandarizado para la producción y evaluación de morteros cementantes hidráulicos mediante ensayos de compresión. La mezcla se formuló con una proporción de 1:2.75 entre cemento blanco Portland CPC 30R-B y arena estandarizada (ASTM C778). Se empleó una relación de agua/cemento de 0.485.



Figura 2. Agitador planetario de la marca Blazer.

La mezcla se llevó a cabo en un mezclador planetario mostrado en la figura 2, siguiendo la secuencia de agitación definida en la norma ASTM C305: 30 segundos a baja velocidad, pausa de 90 segundos para limpiar las paredes del recipiente, y 60

segundos a velocidad media. Esta operación garantiza una dispersión homogénea de las fases y una textura plástica uniforme.

La verificación de la consistencia se realizó mediante el ensayo de flujo conforme la ASTM C1437, obteniendo un valor de 110 ± 5 , dentro del rango aceptable para el procedimiento de moldeo.

El mortero se colocó en los moldes cúbicos de 50 mm x 50 mm x 50 mm en dos capas de igual espesor, cada una compactada mediante 32 golpes, conforme al patrón ortogonal especificado por la norma. Una vez llenados, los moldes fueron nivelados para obtener una superficie plana.

Los especímenes se almacenaron en una habitación con condiciones de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y 70%-80% de humedad relativa, donde permanecieron durante 24 ± 0.5 horas. Transcurrido este periodo, se procedió al desmoldeo con precaución, descartando aquellos cubos con defectos evidentes.

3.2 Tratamiento térmico

Tras el proceso de curado inicial, los especímenes cúbicos mostrados en la figura 3a fueron sometidos a un tratamiento térmico a $90 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 180 minutos, con el propósito de evaluar la evolución térmica del material. El calentamiento se realizó en un horno de convección forzada de la marca FELISA, modelo fe-291 véase la figura 3b.

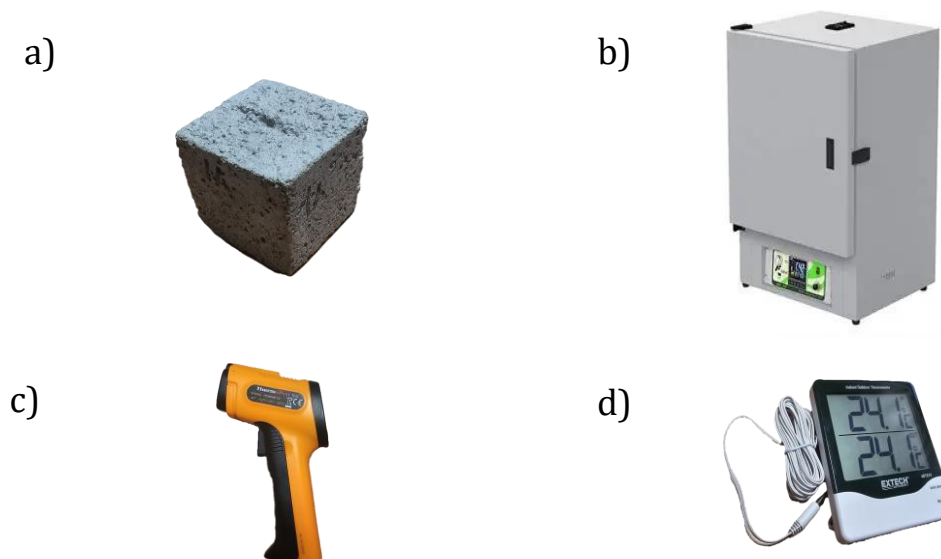


Figura 3. Equipos utilizados durante el tratamiento térmico. a) Cubo de mortero, b) horno, c) pirómetro infrarrojo y d) termómetro digital.

Para el monitoreo de la temperatura superficial de los especímenes, se empleó un pirómetro infrarrojo marca ThermPro mostrado en la figura 3c, modelo TP-30, el

cual permitió obtener mediciones rápidas, sin contacto, y con mínima perturbación del sistema. Las lecturas se realizaron directamente sobre una de las caras de cada cubo, con una frecuencia de un minuto desde el minuto 1 hasta el minuto 180. La sonda fue alineada de manera perpendicular al plano superficial, manteniendo una distancia constante para garantizar la precisión y reproducibilidad de los datos. No se realizaron réplicas para esta etapa.

De forma complementaria, se controló la temperatura ambiente durante todo el tratamiento térmico mediante un termómetro digital con sonda metálica mostrado en la figura 3d, marca Extech, modelo 401014, que permitió registrar un entorno estable de $32 \pm 1^\circ\text{C}$.

4. Resultados Teórico-Experimentales

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de forma experimental y su comparación con el modelo teórico incorporando las condiciones iniciales y de frontera correspondientes al experimento.

Considerando la idealización descrita en la sección 2.2 podemos encontrar un modelo que incorpora las características del cubo de mortero. Los datos han sido ingresados a la expresión (6) junto con los valores de los parámetros descritos en la fórmula, dando como resultado la figura 2, en la cual se muestra la distribución con respecto a una de las caras en su evolución a lo largo de 3 horas de medición a intervalos de un minuto para cada medición de la temperatura y en un rango de $0 \leq x \leq L$. Vemos que la temperatura es ligeramente menor en los extremos del cubo, en comparación del punto central $L = 0.025\text{m}$. Todas las gráficas mostradas en este artículo se han generado con el software Wolfram Mathematica 12.0.

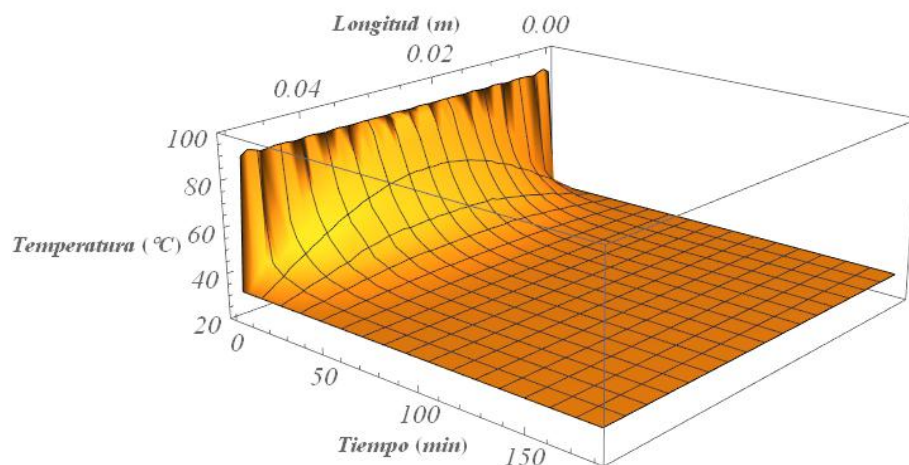


Figura 4. Gráfica de evolución de temperatura, para una de las caras de un cubo sólido ideal con las 6 caras sometidas a la misma temperatura constante T_0 .

En la figura 4, se muestra la gráfica de la expresión (6) manteniendo el punto fijo $x_0 = 0.025m$ y con los mismos parámetros definidos en la sección 2.2, de esta forma se observa la evolución de la temperatura a lo largo de 3 horas de muestreo. Asimismo, se han considerado las gráficas para varios valores α que se detallan en la figura 5, esto con el fin de obtener la mejor aproximación a los datos experimentales y poder determinar en forma empírica el valor de la constante α para el material mortero utilizado.

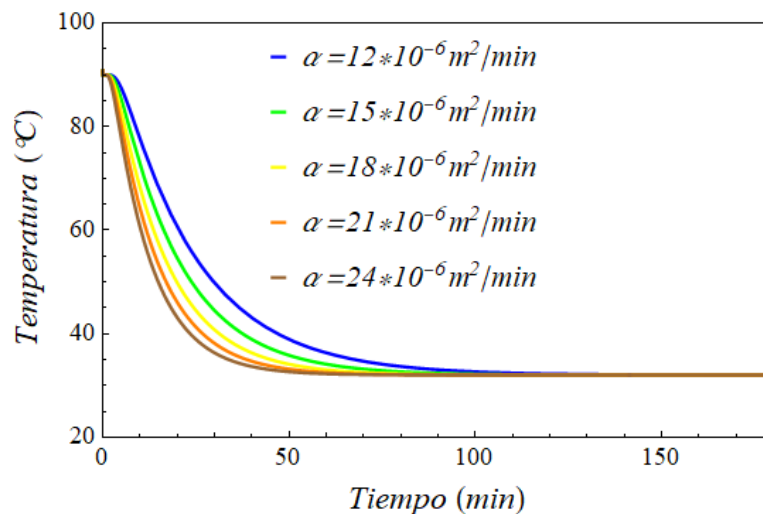


Figura 5. Gráfica de evolución de temperatura, para varios valores de α con la posición $x_0 = 0.025m$, con respecto a una de las caras de un cubo sólido ideal con las 6 caras sometidas a la misma temperatura constante T_0 .

En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos a partir del diseño experimental propuesto, los cuales se presentan a intervalos de un minuto considerando que este es un margen de tiempo adecuado para obtener una medición confiable tomando en cuenta las maniobras para la adquisición del dato. Asimismo, se toman un margen de tiempo de 180 minutos suficientes hasta que se logra alcanzar la temperatura de equilibrio. Notemos que la temperatura de equilibrio se adquiere aproximadamente a partir del minuto 120, después las variaciones son del orden de $\pm 0.1^\circ\text{C}$, comportamiento que se encuentra en concordancia con el modelo propuesto en la Figura 5 para $\alpha = 18 \times 10^{-6} m^2/min$.

Tabla 1. Datos obtenidos al realizar la medición de temperatura en una de las caras del cubo de material mortero, donde t es el tiempo en minutos y T es la temperatura registrada en grados Celsius, se ha tomado como temperatura inicial al tiempo $t=0$ una temperatura de $T=90.3^\circ\text{C}$.

t (min)	T ($^\circ\text{C}$)	t (min)	T ($^\circ\text{C}$)	t (min)	T ($^\circ\text{C}$)	t (min)	T ($^\circ\text{C}$)	t (min)	T ($^\circ\text{C}$)	t (min)	T ($^\circ\text{C}$)
1	86.0	31	44.3	61	37.0	91	33.4	121	32.2	151	32.1
2	83.7	32	43.9	62	34.6	92	33.4	122	32.2	152	32.1
3	79.4	33	43.7	63	34.5	93	33.4	123	32.2	153	32.1
4	77.8	34	43.3	64	34.4	94	33.4	124	32.2	154	32.1

5	74.7	35	43.2	65	34.4	95	33.3	125	32.2	155	32.1
6	71.0	36	43.0	66	34.4	96	33.3	126	32.2	156	32.1
7	70.0	37	42.8	67	34.2	97	33.3	127	32.2	157	32.1
8	69.6	38	42.4	68	34.0	98	33.3	128	32.2	158	32.1
9	66.6	39	41.7	69	34.0	99	33.3	129	32.2	159	32.1
10	64.4	40	41.0	70	34.3	100	33.2	130	32.2	160	32.0
11	63.7	41	40.5	71	34.3	101	33.1	131	32.1	161	32.0
12	62.2	42	40.0	72	34.3	102	33.1	132	32.1	162	32.0
13	60.4	43	39.8	73	34.3	103	33.0	133	32.1	163	32.0
14	58.7	44	39.6	74	34.2	104	33.0	134	32.1	164	32.0
15	57.3	45	39.4	75	34.1	105	32.9	135	32.1	165	32.0
16	56.7	46	39.1	76	34.1	106	32.9	136	32.1	166	32.0
17	55.2	47	39	77	34.0	107	32.9	137	32.1	167	32.0
18	54.4	48	38.9	78	34.0	108	32.9	138	32.1	168	32.0
19	53.4	49	38.7	79	34.0	109	32.8	139	32.1	169	32.0
20	52.1	50	38.5	80	34.0	110	32.8	140	32.1	170	32.0
21	51.3	51	38.1	81	33.9	111	32.7	141	32.1	171	32.0
22	50.9	52	38.0	82	33.9	112	32.7	142	32.1	172	32.0
23	50.6	53	37.8	83	33.8	113	32.6	143	32.1	173	32.0
24	49.5	54	37.5	84	33.7	114	32.6	144	32.1	174	32.0
25	48.4	55	37.0	85	33.6	115	32.5	145	32.1	175	32.0
26	48.1	56	37.0	86	33.5	116	32.4	146	32.1	176	32.0
27	47.5	57	36.5	87	33.5	117	32.4	147	32.1	177	32.0
28	47.0	58	36.0	88	33.5	118	32.3	148	32.1	178	32.0
29	46.3	59	37.3	89	33.5	119	32.3	149	32.1	179	32.0
30	45.2	60	37.2	90	33.5	120	32.3	150	32.1	180	32.0

Para el análisis, es frecuente representar los datos censados en forma visual. Por ello, en la figura 6, podemos observar la gráfica de temperaturas obtenidas basado en la tabla 1 como función del tiempo a intervalos de un minuto durante 180 minutos y se denota por $U[n]$, junto con el modelo correspondiente obtenido de la figura 5 tomando como valor de:

$$\alpha = 18.00 \times 10^{-6} m^2/min$$

como mejor aproximación y denotada por $u(x_0, t)$.

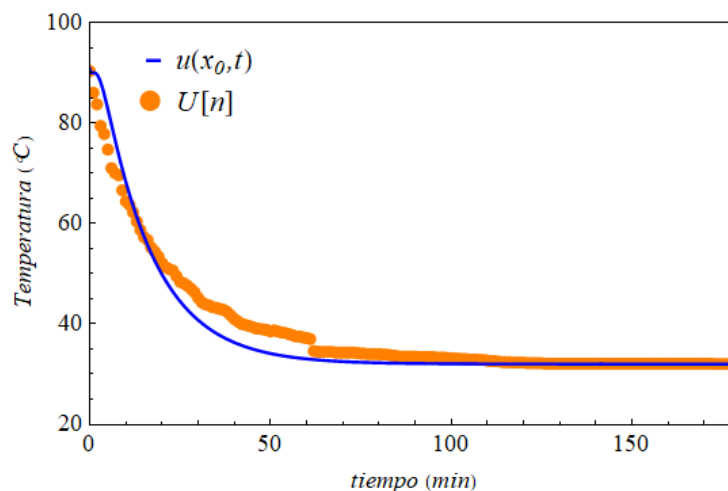


Figura 6. Gráfica de datos experimentales comparados con el modelo ideal para la distribución de temperaturas en una de las caras de un cubo sólido tomando como referencia el punto central de la cara con $x=0.025$ m con las 6 caras sometidas a la misma temperatura.

Cabe mencionar que la medición de la temperatura se ha tomado en una de las caras laterales y no de la superior o inferior, justo en el punto central del cuadrado de la cara. El coeficiente de difusividad térmica α del mortero puede variar debido a las diferentes condiciones de caracterización y dependiendo de su composición, cantidad de agua, de aditivos, de cemento, de arena etc. por lo que los rangos estimados del coeficiente varían típicamente entre $18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{min} > \alpha > 62.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{min}$ en concordancia con los valores obtenidos en la tabla 2. El valor reportado en este trabajo se encuentra en el límite bajo de los rangos establecidos.

Tabla 2. Rangos para valores típicos del coeficiente de difusividad térmica con respecto a varios autores. Las referencias han sido dispuestas de mayor a menor rango de valores de la difusividad térmica.

Referencia	$\alpha(10^{-6} \text{ m}^2/\text{min})$
Shafigh P. et al. [31]	53.4 - 61.8
Stolarska A. and Strzalkowski J. [28]	42.6 - 57.6
Incropera F. P. et al. [29]	29.4
Gbekou F. K. et al. [32]	18 - 62.4
Bamogo S. et al. [30]	18 - 42

Con respecto a los trabajos reportados en la tabla 2, donde se utilizan máquinas especializadas vemos que el método propuesto es relevante, debido a que se utiliza

equipo de bajo costo, se pueden estudiar distintas composiciones y permite estudiar diferencias de carga de tales compuestos.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó la caracterización de un sólido de mortero de geometría cúbica, el cual se ha sometido a una fuente de calor uniforme y homogénea dando como resultado una distribución de temperaturas sobre todas las caras del cubo de manera uniforme. Posteriormente se realiza la medición de la temperatura en una de las caras y se desarrolla un modelo que concuerda con las características del experimento realizado conforme al marco teórico estándar. Al comparar ambos esquemas tanto el teórico como el experimental se puede observar una concordancia efectiva como se muestra en la figura 6. Para efecto de validar el experimento se calcula el valor numérico de la difusividad térmica de la muestra de mortero utilizada, obteniendo un valor dentro de los rangos comúnmente aceptados de la literatura. Cabe resaltar que los resultados obtenidos aceptables, aun cuando se ha implementado un montaje experimental de bajo costo. Como trabajo a futuro se busca mejorar las condiciones de medición de la temperatura de la muestra para adquirir una mayor exactitud.

Agradecimientos

Los autores agradecen al M.C. Jahaziel Méndez García por su valioso apoyo en la elaboración de los cubos de mortero, los cuales permitieron validar experimentalmente el desarrollo teórico del proyecto. Asimismo, agradecen al estudiante de Ingeniería en Mecatrónica Leonardo Fabricio Rayas Galindo por la realización del experimento y la adquisición de datos. Se hace una dedicatoria especial de este trabajo por parte de uno de los autores a la memoria de Sra. Celia Loreto Estrada.

Referencias

1. J. Fourier, *Analytical Theory of Heat*, Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press, 1878.
2. J. H. Lienhard, "Notes on the origins and evolution of the subject of heat transfer," *Mechanical Engineering*, vol. 105, no. 6, pp. 20–27, 1983.
3. S. Esposito, "Reconstructing the early history of the theory of heat through Fourier's experiments," *Eur. J. Phys.*, vol. 44, no. 5, pp. 1-18, 2023.
4. S. V. Meschel, "A brief history of heat measurements by calorimetry with emphasis on the thermochemistry of metallic and metal-nonmetal compounds," *Calphad*, vol. 67, p. 101714, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2019.101714>
5. M. T. Marvila, A. R. G. Azevedo and S. N. Monteiro, "Verification of the application potential of the mathematical models of Lyse, Abrams and Molinari in mortars based on cement and lime", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 7327–7334, 2020. doi: [10.1016/j.jmrt.2020.04.077](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.077)
6. W. Yue and B. Wang, "Ceramic-added lime and cement mortars: A review of applications in building products", *Sci. Prog.*, vol. 107, no. 3, 2024. doi: [10.1177/00368504241266559](https://doi.org/10.1177/00368504241266559)

7. P. Shafigh, I. Asadi, A. R. Akhiani, N. B. Mahyuddin, and M. Hashemi, "Thermal properties of cement mortar with different mix proportions," *Materiales de Construcción*, vol. 70, no. 339, p. e224, 2020. [Link]
8. J. A. Acevedo-Díaz, A. García-Carmona, M. del M. Aragón-Méndez and J. M. Oliva-Martínez, "Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica," *Rev. Cient.*, vol. 30, no. 3, pp. 155–166, 2017. doi: 10.14483/23448350.12288
9. M. de los Angeles Bizzio, A. M. Guirado and C. I. Maturano Arrabal, "Uso de simulaciones científicas interactivas para fortalecer la formación inicial de docentes de Química," *Revista Educación*, Vol. 48, No. 1, pp. 522–542, 2024. doi: 10.15517/revedu.v48i1.56052
10. C. Ruiz-Martín, "Theory and Foundations of Modeling and Simulation", *The Journal of the Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 12, no. 5, pp. 762-771, 2023. doi: 10.1177/00375497231171140
11. C. Tamayo-Roca, M. Roca-Revilla and G. Nápoles-Quñones, "La modelación científica: algunas consideraciones teórico-metodológicas," *Revista Santiago*, No. 42, pp. 79–90, 2017.
12. M. Berges Díaz, "La modelación como método teórico de la investigación educativa", *Revista Varela*, vol. 9, no. 24, pp. 62–74, 2009. [Link]
13. T. Ting, X. Wang, W. Chen and C. Wang, "Model calibration and validation from a statistical inference perspective", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 410, p. 115771, 2023. doi: 10.1016/j.cma.2023.115771
14. J. Paquette-Rufiange, P. Lemaire and C. Gogu, "Optimal design of validation experiments for the prediction of quantities of interest", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, vol. 412, p. 115889, 2023. doi: 10.1016/j.cma.2023.115889
15. J. M. Caro, J. M. Kolominsky-Rabas and E. S. P. Ting, "A Review of Validation and Calibration Methods for Health Care Modeling and Simulation", *Appl. Health Econ. Health Policy*, vol. 23, no. 2, pp. 135–148, 2023. doi: 10.1007/s40258-023-00776-3
16. D. Sornette, R. Woodard, W.-X. Zhou and S. N. Pisarenko, "General strategy for physics-based model validation", *Computational Mechanics*, vol. 41, no. 5, pp. 741–752, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00466-007-0160-5>
17. C. D. Anderson, "The Positive Electron," *Physical Review*, vol. 43, no. 6, pp. 491–494, 1933. doi: 10.1103/PhysRev.43.491
18. B. P. Abbott et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, no. 6, p. 061102, 2016. doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102
19. G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", *Phys. Lett. B*, vol. 716, no. 1, pp. 1–29, 2012. doi: 10.1016/j.physletb.2012.08.020
20. K. Y. Montoya Suárez, C. C. Rodríguez Correa "Distribuciones de temperaturas en conductores térmicos" *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 10, No. 4, pp. 4310-5, 2016.
21. Y. Li, H. Liu, L. Xie and X. He, "Mathematical modeling of heat distribution for the pan in a baking oven," *Adv. J. Food Sci. Technol.*, vol. 8, no. 10, pp. 747–750, 2015. doi: 10.19026/ajfst.8.1601
22. O. Aguilar-Loreto, J. A. Muñoz-Gómez and J. M. Fernández-Raudales, "Análisis de la distribución de temperatura sobre una barra con Arduino," *Memorias del 13 Congreso Nacional de Mecatrónica*, Querétaro, México, 2014. [Link]
23. R. Haberman, "Elementary Applied Partial Differential Equations: With Fourier Series and Boundary Value Problems," Prentice-Hall, 2nd ed. 1987.
24. G. B. Arfken, Hans J. Weber "Mathematical Methods for Physicists," Academic Press, 4th ed. 1995.

25. R. B. Guenther, John W. Lee "Partial Differential Equations of Mathematical Physics and Integral Equations," Dover Publications, 1996.
26. R. V. Churchill "Fourier and Boundary Value Problems," Boston: McGraw Hill, 1941.
27. T. Mint-U, L. Debnath "Linear Partial Differential Equations for Scientists and Engineers" Birkhauser Boston, 4th ed. 2007. doi: 10.1007/978-0-8176-4560-1
28. A. Stolarska y J. Strzałkowski, "The Thermal Parameters of Mortars Based on Different Cement Type and W/C Ratios", *Materials*, vol. 13, no. 19, art. 4258, 2020, doi: 10.3390/ma13194258
29. F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6.^a ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
30. S. Bamogo, F. Zoma, E. Malbila and D. Toguyeni, "Thermal Characterization of Concrete and Cement Mortar from Construction Sites and Industrial Production Units in the City of Ouagadougou with a View to Standardization in Energy Certification", *Engineering*, vol. 15, pp. 396–415, 2023. doi: 10.4236/eng.2023.156031
31. P. Shafigh, et al., "Thermal properties of cement mortar with different mix proportions," *Materiales de Construcción*, vol. 70, no. 339, 2020. doi: 10.3989/mc.2020.09219
32. F. K. Gbekou, A. Boudenne, A. Eddhahak and K. Benzarti, "Mechanical and thermal properties of cement mortar composites incorporating micronized miscanthus fibers", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, pp. 7649–7664, 2023. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.093