3 Avances en ingeniería

Desafíos en ciencia y tecnología: Transformando ideas en soluciones

Ángel Tlatelpa Becerro
Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Desafíos en ciencia y tecnología: Transformando ideas en soluciones

Ángel Tlatelpa Becerro
Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla

Desafíos en ciencia y tecnología: transformando ideas en soluciones / Ángel Tlatelpa Becerro, Guillermo Raúl Carbajal Pérez, (coordinadores). - - Primera edición. - - México : Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 2026.

303 páginas : ilustraciones .- - (Avances en ingeniería ; 3)

ISBN: 978-607-8951-74-1 (serie)
ISBN: 978-970-96480-6-5 (volumen 3)

1. Ingeniería – Investigación 2. Innovaciones tecnológicas – Investigación 3. Instrumentos de medición 4. Automatización 5. Robótica

LCC TA160 DC 620.0072

Esta publicación fue dictaminada por pares académicos bajo la modalidad doble ciego.

Desafíos en ciencia y tecnología: Transformando ideas en soluciones
Primera edición, noviembre de 2026

D.R. 2026, Ángel Tlatelpa Becerro y Guillermo Raúl Carbajal Pérez (coords.).
D.R. 2026, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209.
Cuernavaca, Morelos, México.
publicaciones@uaem.mx
libros.uaem.mx

Colaboradores: Víctor Manuel Zezatti Flores, Erick Omar Castañeda Magadán, Miriam Navarrete Procopio, Samuel Portillo Contreras, Miguel Ángel Chagolla Aranda, Vicente Noé Rojas Mendoza, José Ernesto Pliego Sánchez, Arly Darío Rincón Quintero, Camilo Leonardo Sandoval Rodríguez.

Corrección de textos y formación: Eliezer Cuesta Gómez.
Diseño de portada: Lizbeth Zenteno.
Imagen de portada: Freepick.

ISBN serie Avances en ingeniería: 978-607-8951-74-1
ISBN volumen 3: 978-970-96480-6-5

DOI: 10.30973/2026/avances_ingenieria_3

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



Hecho en México

Contenido

Presentación 9

Evaluación del impacto de un tablero didáctico fotovoltaico *off-grid* en el proceso de enseñanza de sistemas solares

Misael Méndez Garnelo, Demian Flores Sánchez, Javier Carmona Llamas, Ángel Tlatelpa Becerro 11

Absorbent solution saturation for the post-combustion CO_2 capture process at laboratory scale

K. A. Altamirano Tlali, Laura Castro, Miriam Navarrete Procopio, Víctor Manuel Zezatti Flores, Ángel Gabriel Fernando Correa Barrera, Veronica Viviana Sandoval Perez 23

Novel stainless steel forged and nitrided for heat pumps generators

Ricardo Reyes Hernández, Víctor Manuel Zezatti Flores, David Juárez Romero, Ángel Tlatelpa Becerro, Miriam Navarrete Procopio, Erick Omar Castañeda Magadán 35

Diseño y optimización de un aerogenerador utilizando polímeros reciclados para la construcción de los álabes

Luis Manuel Valverde Cedillo, Oscar Odin Trujillo Letechipia, Yonathan Sanchez Bailon 47

Sistema de control ambiental con ESP32-CAM para bodegas agrícolas

Jared Roberto Morales Urueña, Yael Alonso Portillo Urueña, Ángel David Díaz Damián, Ángel Yahir Morales Reyes, José María Servín Olivares 61

Estudio técnico para la valorización de residuos sólidos orgánicos vegetales provenientes de la plaza de mercado San Francisco de Bucaramanga, Santander. Estudio de caso

Alba Josefa Vargas Buitrago, Carlos Alberto Amaya Corredor, José Luis Bautista González 77

Development of a DAQ for a desorption process

Veronica Viviana Sandoval Perez, Angel Gabriel Fernando Correa Barrera, Miriam Navarrete Procopio, Víctor Manuel Zezatti Flores, K. A. Altamirano Tlali 87

Aplicación de la metodología de sistemas blando en acción en un sistema productivo y organizacional de una PYMEX

Jorge Tello Cruz, Rebeca Reyes de la Rosa, Zeus Iván Rangel Diaz 97

Robot didáctico impreso en 3D basado en comunicación *bluetooth*

Jesus Elias Marin Garcia, Gonzalo Solano Ruiz, Noemi Hernández Oliva, Marisol Alejandre Flores 109

Diseño y desarrollo de un titulador ácido-base automatizado para su uso en clase STEAM

Liliana Cajero Sotelo, Manuel Eduardo Serrano Nava, Yazmin Alejandra Ortega Jaramillo, Miguel Ángel Román Olivares 125

Efectividad de la biofertilización sobre el crecimiento vegetativo en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.)

Yessica Flor Cervantes-Adame, Cid Aguilar-Carpio, Paulina Osorio-Olivera, Elizabeth Broa-Rojas, Gregorio Bahena-Delgado 141

Bioherbicida y herbicida: su efecto en el manejo de malezas y productividad en el cultivo de nopal verdura

Cid Aguilar Carpio, José Alberto Salvador Escalante Estrada, Yessica Flor Cervantes Adame, Adriana Pérez Ramírez 151

Análisis de un diseño novedoso de la estructura del campo de flujo biointerdigitado para una batería de flujo redox orgánico mediante un modelo en 3D-CFD

Gustavo Aparicio Mauricio, Isidro J. González Panzo, Martin R. Cruz Díaz 159

Design of a three-fingered underactuated robotic gripper with two joint movements

Francisco Ortega Zamora, Luis Govinda García Valdovinos, Francisco David Pérez Reynoso 171

Obtención de la tenacidad a la fractura del acero SAE 1045

Rita Aguilar Osorio, Alfredo Maciel Cerda, Erick Omar Barrera Parangueo 183

Diseño de resonador acústico fabricado mediante impresión 3D para moldeo por inyección

Edwin Francisco Pérez Rosete, Samuel Portillo Contreras, Kevin Santana Ávila, Adrián Tapia Rivera 195

Simulador didáctico de procesos automatizados, basado en PLC y HMI para la formación práctica de estudiantes de ingeniería

Samuel Portillo Contreras, María Fernanda Gonzaga Rosendo 207

Simulación y análisis comparativo del desempeño de tecnologías fotovoltaicas policristalina y monocristalina

H. Coello-Sánchez, M. A. Chagolla-Aranda, M. A. Chagolla-Gaona, E. J. Moreno-Carpintero 219

Diseño y análisis del rendimiento termosolar de sistemas fotovoltaicos conectados a la red en dos regiones de México

Omar Oziel Vázquez Hernández, Omar Arturo Castillo Méndez, Mardero José Toledo Wong, Ma. Guadalupe López López, Víctor Manuel Alvarado Martínez 231

Detección y clasificación de fallas en sistemas fotovoltaicos mediante redes neuronales artificiales embebidas en una arquitectura IoT

José Ricardo Castelo Salazar, José Antonio Marbán Salgado, Jorge Arturo Sandoval Espino, Roberto Alan Beltrán Vargas, Diego Seuret Jiménez 247

Design of a test bench as a prototype of a falling film heat exchanger to evaluate wetting performance in enhanced-texture tubes

Javier Delgado-Gonzaga, Wilfrido Rivera, David Juárez-Romero, Alfredo Gil Velasco, Miriam Navarrete Procopio, Marcos Xavier Hernández Teodoro, Miguel Israel Heredia García 261

Desarrollo de un sistema domótico a escala controlado por movimientos oculares como tecnología de asistencia para personas con síndrome de enclaustramiento

Luis Adrian Lara Ocampo, Diego Hernández Cabrera, Héctor Miguel Buenabad Arias, Antonio Isaias Martínez Santos, Miguel Angel Basurto Pensado, Daily Quintana Fuentes, Javier Emmanuel Rodríguez Degante, Jonathan Villanueva Tavira, Andrés Blanco Ortega 271

Thermal characterization of a solar dryer like an alternative sustainable dry on climatological conditions in autumn

Arturo Álvarez Galeana, Erick Omar Castañeda Magadán, Víctor Manuel Zezatti Flores, Ángel Tlatelpa Becerro, Erick César López-Vidaña 283

Integration of solar heat storage system for the continuous powering of an absorption heat transformer: Autonomous University of Morelos study case

Luis Adrián López Pérez, Armando Huicochea, Tabai Torres Díaz, Javier Delgado Gonzaga, Sandro Guadalupe Pérez Grajales 291

Conclusión 303

Agradecimientos

*En la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (*EES-*Yecapixtla), se ha organizado una serie de congresos (2022, 2023, 2024 y 2025) en el campo de la ingeniería, con el objetivo de explorar los desarrollos en la ciencia y la tecnología, así como para promover la colaboración y el intercambio de vivencias entre estudiantes, egresados, académicos y científicos. Estas vivencias fortalecen, con un enfoque práctico, a la* EES-*Yecapixtla, brindando actividades significativas para toda la comunidad, como la elaboración del presente libro, que se ha creado a partir del V Congreso de Ingeniería realizado en abril de 2026.*

Presentación

En el campo de la ciencia y tecnología, es importante la actualización constante en las distintas ramas de la ingeniería para impactar tanto en el sector académico como en el industrial para reportar avances que contribuyan tecnológicamente a través de contribuciones innovadoras. Con esta obra se fomentan los desafíos científicos y tecnológicos, además de la transformación de ideas en soluciones por los investigadores y tecnólogos que se enfoquen a los estudiantes de ingeniería, que podrán conocer las aplicaciones multidisciplinarias, el estudio y diseño de sistemas y procesos industriales.

En estos tiempos, uno de los desafíos más grandes en el campo de la ingeniería es la búsqueda de soluciones de diseño y optimización tecnológicos con enfoque sustentable. La enseñanza de la ingeniería tiene que contar con esta trazabilidad de desarrollos sostenibles. Este libro presenta 26 trabajos de investigación enfocados en el análisis de datos, diseño, instrumentación, control, automatización, programación y la robótica para diferentes equipos, sistemas y procesos. Se presentan estudios de casos reales, construcción de prototipos y detalles para la implementación de las tecnologías.

Evaluación del impacto de un tablero didáctico fotovoltaico *off-grid* en el proceso de enseñanza de sistemas solares

Misael Méndez Garnelo,[a*] Demian Flores Sánchez,[a]
Javier Carmona Llamas,[a] Ángel Tlatelpa Becerro[a]

Abstract

Training in photovoltaic systems creates a significant gap between theoretical knowledge and practical skills. To mitigate this deficiency, an off-grid photovoltaic educational board was designed and evaluated, with a focus on direct interaction with the system's components. The study employed a quasi-experimental design with 215 high school students. The methodology assessed learning through a practical, demonstrative intervention with the board. The results indicated a 100 % improvement in participant learning, demonstrating a greater understanding of the subject. The educational board has been confirmed as an effective pedagogical solution that promotes the development of essential skills and ensures the quality of learning.

Keywords: solar photovoltaic energy, teaching materials, practical learning, theory-practice gap, off-grid systems.

Introducción

En los últimos años, la necesidad de mitigar el cambio climático ha impulsado la adopción de energías renovables. Entre ellas, la energía solar fotovoltaica (FV) destaca como una alternativa clave para la generación de electricidad sostenible. La rápida expansión de esta tecnología ha generado una demanda significativa de profesionales y técnicos con conocimientos especializados, un desafío

[a] Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.
[*] Autor de correspondencia: misael.mendez@uaem.edu.mx

clave para garantizar el éxito de la transición energética (Equipos y Talento, 2024). A pesar de la creciente necesidad de personal cualificado, la formación en sistemas fotovoltaicos a menudo se enfoca de manera excesiva en la teoría. Esta limitación crea una brecha considerable en el aprendizaje práctico, e impide que los estudiantes desarrollen una comprensión integral y tangible de la dinámica de los sistemas FV, desde la función de cada componente hasta la complejidad de sus conexiones (Universidad Autónoma del Estado de Morelos [UAEM], 2023; Velasco, 2019). Por consiguiente, esta carencia no solo obstaculiza la competencia técnica, sino que también frena la concientización general sobre los beneficios ambientales de la energía limpia.

La falta de interacción física con el equipo real limita la habilidad de los futuros profesionales para resolver los problemas y el análisis de fallas. La formación técnica ha utilizado tradicionalmente bancos de pruebas enfocados exclusivamente en la medición del rendimiento del panel fotovoltaico (curvas de potencia y eficiencia). Si bien estos dispositivos son útiles para entender la física del semiconductor, presentan una limitación en la enseñanza de la gestión energética sistémica. Ante esto, el desarrollo de herramientas interactivas se propone como una solución viable al desconocimiento de sistemas solares (Valadez-García y Martagón-Cabrera, 2021; IRENA, 2023).

Bajo esta premisa, se ha diseñado y construido un Tablero Didáctico Fotovoltaico *off-grid*. A diferencia de los bancos de pruebas convencionales que analizan el panel de forma aislada, este prototipo permite al estudiante interactuar con la cadena total de suministro: regulación de carga, almacenamiento y conversión de corriente mediante inversores de onda pura para alimentar cargas reales. Este dispositivo funciona como una representación física que permite realizar mediciones de voltaje en tiempo real y experimentar con diferentes pruebas de carga, convirtiendo conceptos abstractos en una experiencia tangible (Ilumin, s. f.).

La finalidad de esta investigación es evaluar la efectividad y la eficiencia del uso del tablero didáctico fotovoltaico como una forma actualizada para la enseñanza de los sistemas solares. Específicamente, se busca verificar si su diseño práctico contribuye a cerrar la brecha de forma significativa entre el

conocimiento teórico y la aplicación práctica con los estudiantes, optimizando la asimilación del conocimiento y la formación de una ciudadanía preparada para un futuro energético sostenible.

Materiales y metodología

Método de encuesta o evaluación

La investigación adoptó un diseño cuasiexperimental pre/post-test, no aleatorizado, para evaluar la efectividad del tablero didáctico en la adquisición de conocimientos. Este tipo de diseño permite tener un punto de referencia inicial (pre-test) y medir la variación de las competencias tras la intervención (post-test). La evaluación estuvo compuesta por un total de 215 participantes, integrados por estudiantes de nivel medio superior, con el objetivo de contabilizar a las personas las cuales tienen conocimiento de esta energía. Los participantes fueron seleccionados por conveniencia, siendo el público objetivo para el uso del tablero didáctico (Enersun, s. f.).

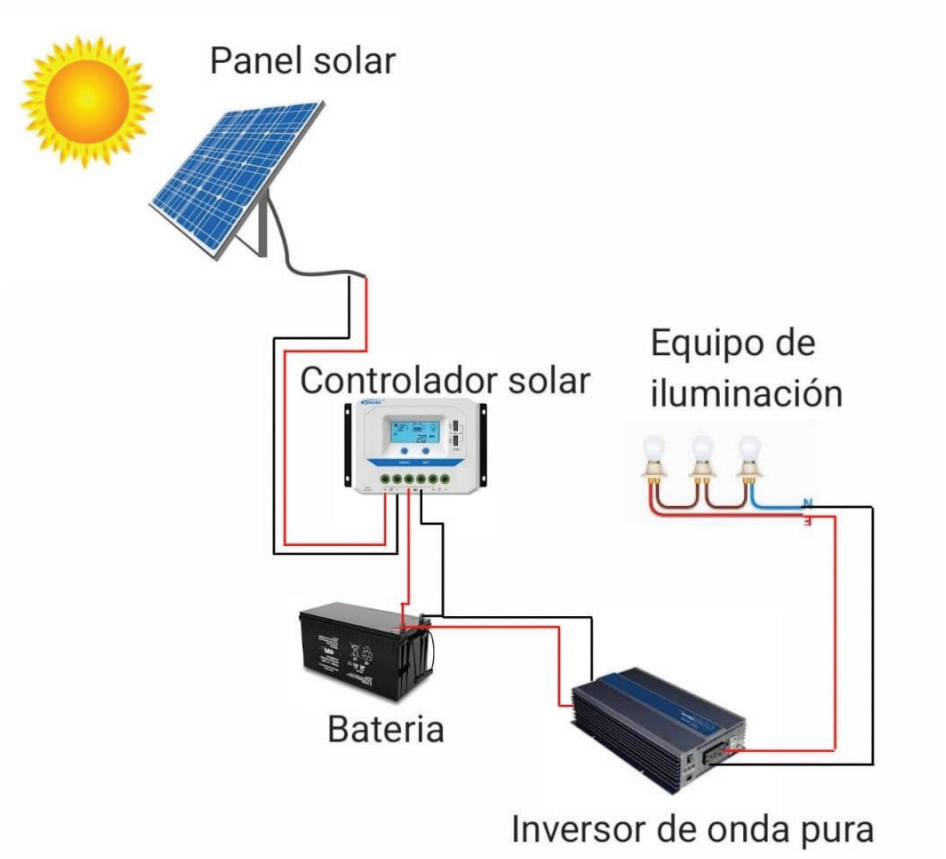
Tablero didáctico

El tablero Didáctico está diseñado para su uso académico con el principal objetivo del aprendizaje en sistemas fotovoltaicos, en este caso en particular, el sistema *off-grid* (Canny, 2020).

El modo de conexión de como el tablero y sus elementos funcionan se pueden visualizar en las Figuras 1 y 2 junto con la Tabla 1.

Fue diseñado a escala de laboratorio y su funcionamiento es de manera autónoma.

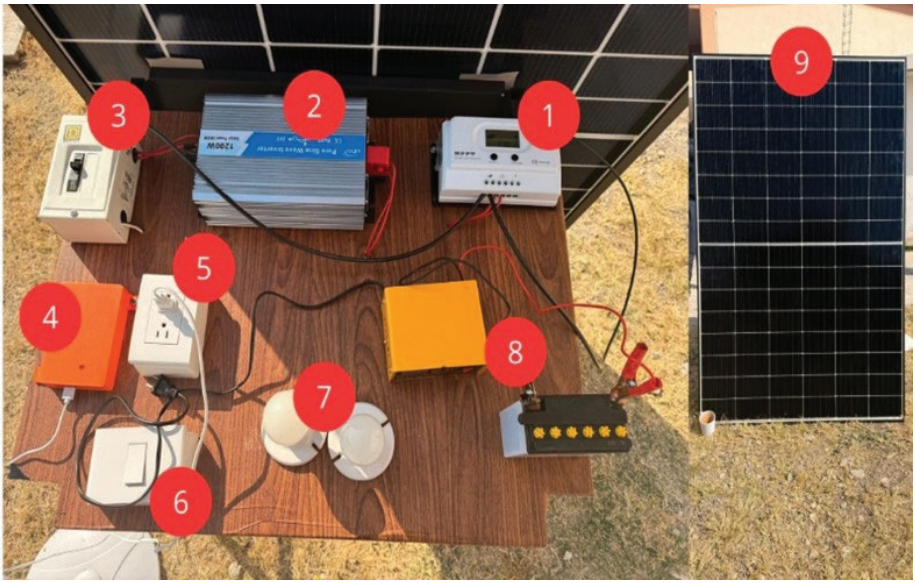
Figura 1. Sistema fotovoltaico off-grid



Propósito: Servir como una herramienta práctica que permite la interacción directa con los componentes esenciales de un sistema aislado. El diseño es modular y presenta puntos clave para conocer tanto el funcionamiento del sistema como revisar su correcto funcionamiento (Enersun, s. f.; Canny, 2020; Secretaría de Energía, 2022; Gómez, 2018).

La herramienta facilita la visualización en tiempo real de los principios de operación y los efectos de pruebas de carga y fallas simuladas, mitigando la abstracción de los conceptos teóricos (Martínez, 2021; Smith y Johnson, 2019; Morales, 2020; Castro, 2022).

Figura 2. Componentes del tablero didáctico



Instrumentos de medición

Se utilizó una única encuesta de conocimiento (pre/post-test), diseñada para evaluar la comprensión teórica y práctica de los sistemas FV.

La encuesta fue implementada digitalmente a través de formularios de Google para garantizar la uniformidad de obtener y leer los datos, además de facilitar el procesamiento de estadística.

El instrumento se centró en la identificación de componentes, la comprensión de las funciones básicas (por ejemplo, el efecto fotovoltaico) y el diagnóstico de la configuración del sistema *off-grid*.

Procedimiento de intervención

La evaluación se llevó a cabo en tres fases consecutivas para cada grupo de participantes:

Tabla 1. Componentes del tablero fotovoltaico

Núm.	Componentes	Descripción	Uso
1	Controlador de carga.	Se encarga de regular el voltaje de entrada para mandarlo a las baterías y el sistema.	Protege y regula el sistema de carga y distribuye el voltaje captado del panel.
2	Inversor de corriente de onda pura.	Transforma la corriente continua de 24 v a corriente alterna de 127 v.	Eleva la tensión a niveles adecuados para el uso doméstico.
3	Centro de carga.	Caja para distribuir conexiones eléctricas.	Protege el cableado, las conexiones y los aparatos de sobre cargas.
4	Centro de carga rápida.	Cargador de carga rápida de hasta 100 w.	Carga dispositivos electrónicos de una manera segura y regulada
5	Contactos (120 v)	Enchufe para aparatos domésticos.	Punto de prueba de voltaje además de prueba de aparatos.
6	Apagador.	Dispositivo eléctrico que permite el paso de corriente.	Permite el encendido y apagado de los focos.
7	Sockets con focos led (conexión en serie).	Sistema de iluminación de uso doméstico.	Indicadores de que el sistema está energizado y funciona correctamente.
8	Cargador de baterías.	Suministra energía a acumuladores de 12 v.	Prueba la eficacia del sistema.
9	Panel fotovoltaico.	Panel solar que transforma la radiación solar en energía utilizable.	Suministra de carga las baterías y da autonomía a todo el sistema fotovoltaico.

1) Fase pre-test: los participantes completaron la encuesta de conocimiento inicial sin recibir ninguna instrucción previa sobre el tablero, estableciendo su nivel de conocimiento de línea base.
2) Fase de intervención: Se impartió un pequeño taller demostrativo a los participantes. La enseñanza se centró en la explicación de los elementos y la forma en que funciona un sistema fotovoltaico, utilizando el tablero didáctico como eje central para la demostración práctica y la experimentación de las interconexiones.
3) Fase post-test: inmediatamente después del taller, los participantes completaron la misma encuesta de conocimiento (post-test).

Análisis de datos

La efectividad se determinó comparando los resultados obtenidos del pre-test con los resultados obtenidos del post-test. La mejora en el aprendizaje se calculó mediante el análisis de las frecuencias de respuesta correctas a las preguntas clave relacionadas con el funcionamiento del sistema, utilizando las herramientas de gráficos y estadísticas proporcionadas por la plataforma de recolección de datos.

Resultados

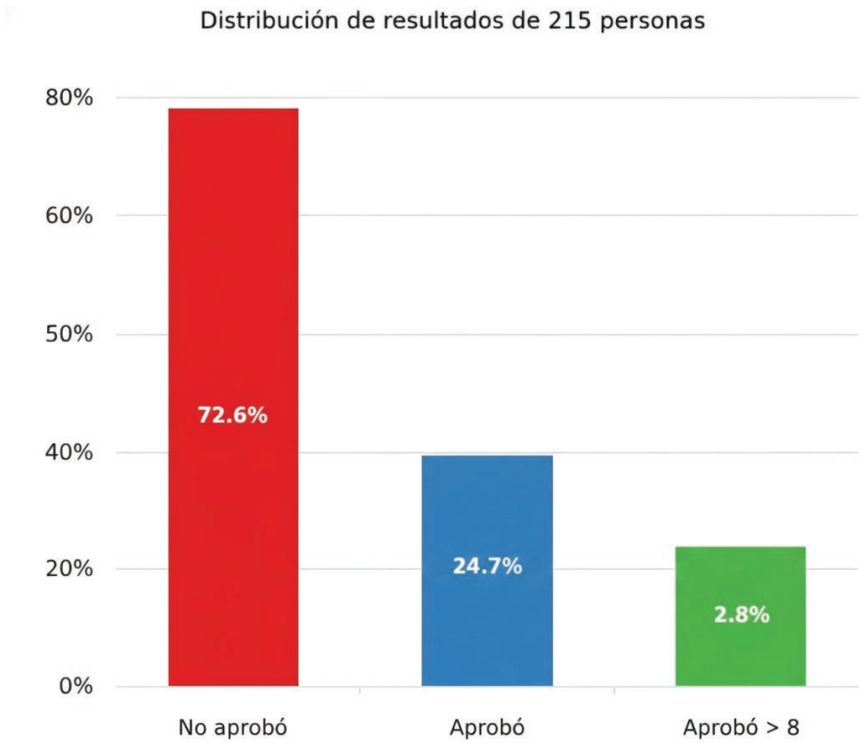
La primera etapa de comprobación, aplicada a una muestra de 215 estudiantes, evidenció la marcada brecha de conocimiento en el manejo de sistemas fotovoltaicos tal como se indican en el índice de la Gráfica 1. Los resultados de la evaluación principal del (pre-test) confirmaron las suposiciones planteadas en la problemática de esta investigación. Se detectó una incapacidad generalizada para relacionar conceptos teóricos con su aplicación funcional, específicamente en áreas críticas como la función del inversor y el flujo de corriente continua. El bajo rendimiento de la muestra indica que la memorización de conceptos no es suficiente para la comprensión técnica.

Índice de reprobación: un contundente 73 % de los participantes reprobó la evaluación inicial (calificación inferior al 70 %). Este porcentaje evidencia que el modelo educativo tradicional no está preparando adecuadamente a los futuros profesionales para las demandas del sector de energías renovables, careciendo de la comprensión holística de la instalación.

Dominio limitado: del 27 % restante que logró aprobar, solamente el 11 % alcanzó una calificación superior al 80 %. Esto significa que, incluso entre los estudiantes con nociones previas, el dominio del tema era insuficiente para considerarse apto en el manejo de estos sistemas.

Estos datos iniciales justificaron la urgencia de integrar una herramienta didáctica. La brecha identificada sirvió como el punto de referencia crítico para

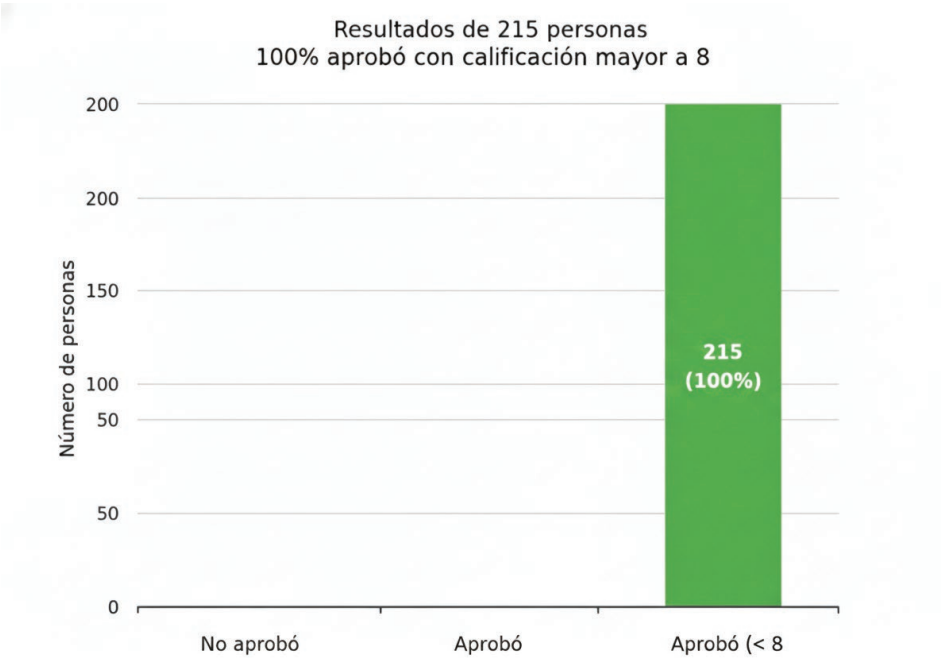
Gráfica 1. Índice de aprobación de la evaluación 1



medir la ganancia de conocimiento en la evaluación posterior. Tras la fase de intervención pedagógica, en donde los 215 estudiantes participaron en un taller práctico con el tablero didáctico, la aplicación de la comprobación final arrojó una transformación total en los resultados, al demostrar el potencial del aprendizaje experiencial tal como se muestra en la Gráfica 2. La mejora dramática se atribuye directamente a la integración sensorial y la comprobación inmediata.

La sesión práctica permitió a los estudiantes conocer que el uso de los puntos de medición eliminó la ambigüedad teórica sobre la conversión DC/AC. Al medir el voltaje variable a la salida del panel y luego observar la estabilidad de 115 V AC del inversor, el concepto dejó de ser abstracto y se convirtió en un fenómeno físico comprobable. La interacción con las cargas de prueba, especialmente el cargador de baterías (que simula un pico de consumo), permitió a los usuarios relacionar la teoría de potencia con la práctica. Esto solidificó el

Gráfica 2. Resultados de la evaluación 2



entendimiento sobre la necesidad de dimensionar correctamente la batería y el inversor. La inclusión de la caja de termomagnéticos reforzó el conocimiento sobre la seguridad operativa.

En este sentido, se demostró una mejora en el 100 % de los encuestados con respecto a sus puntajes iniciales. Este hecho validó la efectividad del tablero para el refuerzo y la adquisición de conocimientos, sin importar el nivel de conocimiento previo. El resultado más significativo fue que la totalidad de los participantes (100 %) obtuvo una calificación superior al 80 % en la comprobación final. Esto es evidencia de que el aprendizaje asistido por el tablero didáctico es un método superior que garantiza resultados de excelencia en un tiempo de instrucción optimizado.

Conclusión

La presente investigación evaluó la efectividad del tablero didáctico fotovoltaico, confirmando su potencial como una herramienta fundamental para la enseñanza práctica de sistemas solares en los niveles medio superior y superior. Los resultados obtenidos permiten concluir que el uso de un tablero didáctico fotovoltaico contribuye de manera significativa al fortalecimiento del aprendizaje en sistemas solares. La implementación de estrategias prácticas favorece la comprensión de conceptos técnicos y mejora el desempeño académico de los estudiantes. Asimismo, se confirma la importancia de integrar herramientas didácticas interactivas en los procesos educativos, especialmente en áreas tecnológicas donde la aplicación práctica es fundamental. Este alarmante dato fundamentó la necesidad urgente de integrar metodologías activas y prácticas en el currículo. Sin embargo, tras la intervención pedagógica con el tablero, la transformación fue total. El logro de que el 100 % de los participantes aprobará la evaluación con una calificación superior al 80 % demuestra que el tablero didáctico cumple con su propósito pedagógico con excelencia. El análisis comparativo final demuestra la eficiencia, versatilidad y validez pedagógica del artefacto. La ganancia de conocimiento observada valida la propuesta del tablero como un método superior y más efectivo para la asimilación de conceptos

técnicos complejos. Específicamente, el dispositivo resultó ser un catalizador, ya que garantizó el dominio técnico, aseguró la superación académica y proporcionó el conocimiento de una forma clara y tangible.

Referencias

Canny, J. (2020). Aprendizaje activo y experimental en la educación técnica superior. *Journal of Engineering Education, 12*(3), 112-125.

Castro, M. (2022). Uso de multímetros y herramientas de diagnóstico en laboratorios de energía renovable. *Manuales de docencia universitaria*. EESY-UAEM.

Enersun. (S. f.). *¿Qué es un sistema fotovoltaico autónomo o aislado?* https://enersun.es

Equipos y Talento. (2024). *El desafío del sector de las energías renovables: la escasez de profesionales cualificados*. https://www.equiposytalento.com/noticias/2024/06/12/el-desafio-del-sector-de-las-energias-renovables-la-escasez-de-profesionales-cualificados

Gómez, L. (2018). Diseño de bancos de pruebas para la medición del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos. *Ingeniería y Desarrollo, 36*(2), 210-225.

Ilumin. (S. f.). *Sistema fotovoltaico aislado de la red-Autónomo-Off grid*. https://ilumin.online/sistema-fotovoltaico-aislado-de-la-red-autonomo-off-grid/

IRENA. (2023). *Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2023*. International Renewable Energy Agency.

Martínez, R. (2021). Metodologías activas para la enseñanza de la física y electricidad en bachillerato. *Revista de Innovación Educativa, 9*(4), 55-70.

Morales, T. (2020). La brecha entre la teoría y la práctica en la formación técnica industrial. *Educación Técnica y Profesional, 15*(2), 88-102.

Ruiz, J. y Lloria, M. (2017). Propuesta de maqueta didáctica para la enseñanza de sistemas fotovoltaicos en educación secundaria. *Revista de Educación e Innovación Tecnológica, 5*(2), 89-105.

Secretaría de Energía. (2022). *Reporte del sector energético: energías limpias en México*. Gobierno de México.

Smith, A. y Johnson, B. (2019). Comparative analysis of off-grid vs. on-grid didactic trainers in STEM education. *IEEE Transactions on Education, 62*(1), 45-52.

Universidad Autónoma del Estado de Morelos. (2023). *Programa educativo de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial*. Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla.

Valadez-García, A. y Martagón-Cabrera, E. (2021). El impacto de la educación práctica en la comprensión de las energías renovables. *Revista Iberoamericana de Educación, 86*(1), 39-54.

Velasco, J. (2019). Evaluación de un prototipo de laboratorio para el estudio de sistemas fotovoltaicos. *Revista Iberoamericana de Tecnología y Ciencias Aplicadas, 7*(1), 45-58.

Absorbent solution saturation for the post-combustion CO_2 capture process at laboratory scale

K. A. Altamirano Tlali,[a*] Laura Castro,[a] Miriam Navarrete Procopio,[b] Víctor Manuel Zezatti Flores,[a] Ángel Gabriel Fernando Correa Barrera,[b] Veronica Viviana Sandoval Perez[b]

Abstract

Global warming is the phenomenon in which the temperature of the atmosphere increases, due to the accumulation of greenhouse gases, including carbon dioxide (CO_2). In Mexico, the main emitters of CO_2 are the electricity and heat generation industries, since their principal fuels are fossil based (oil, natural gas, and coal). To reduce these emissions, CO_2 capture, pre-combustion, oxy-combustion, and post-combustion technologies have been developed. Post-combustion technology is based on absorption-desorption process, in which it is essential to evaluate the saturation of the absorbent. In this work, experimental saturation tests were carried out using monoethanolamine (MEA) at different chemical compositions (10 %, 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % w/w MEA) at two different chemical compositions of CO_2 in the gas stream (12.5 % and 5 % v/v CO_2). The experiments were carried out on a laboratory scale, and the results show that MEA saturation is identified by an increase in the maximum temperature of the solution, both in saturation tests and in continuous tests.

Keywords: saturation, absorbent solution, CO_2 capture, post-combustion.

[a] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[b] Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM.
[*] Corresponding author: karla.altamirano@uaem.edu.mx

Introduction

Global warming is a phenomenon driven by rising temperatures caused by the accumulation of greenhouse gases (GHGs) (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, s. f.) among these; CO_2 is the major contributor to this problem (National Geographic, s. f.). In Mexico, the sectors that contribute most are the electricity and heat generation industries, since their main fuel source is fossil fuels (natural gas, coal, and oil); other contributors include transportation and other industries (Comisión Federal de Electricidad, 2023). Thermoelectric, coal-fired, and combined cycle (CCC) They contribute to a composition of 76 % of the MW demand for electrical energy in Mexico; to mitigate this problem, CO_2 capture technologies have been developed, which are pre-combustion, oxy-combustion, and post-combustion (Savoldelli y Ravelli, 2024; Songolzadeh et al., 2014).

Post-combustion CO_2 capture is a widely used technology that involves absorption-desorption processes, which separate CO_2 from exhaust gases after combustion using a chemical solvent, typically an amine that absorbs CO_2. The absorbed solution is then desorbed through a desorption process for regeneration (Subramanian y Madejski, 2023) 2023. Saturation in absorption tests is important in the CO_2 capture process because it reveals the actual capacity of the absorbent to retain this gas under specific operating conditions (Navarrete Procopio et al., 2023a).

This paper presents laboratory-scale experimental saturation tests of monoethanolamine and H_2O at different concentrations (10 %, 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % w/w) and CO_2 concentrations (12.5 % and 5 % v/v). The experimental system was carried out in the Laboratorio de Operaciones Unitarias of the Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM).

Materials

The absorption process was carried out in a laboratory-scale experimental system, the main component of which is a packed absorption column made of

transparent acrylic. The absorbent solution was fed by a Masterflex® Easy-Load peristaltic pump, which provided precise flow control, while CO_2 was supplied by a Pretul lubricated air compressor and an INFRA industrial-grade CO_2 (carbon dioxide) tank with a purity of ⩾ 99.9 % by volume, suitable for gas-liquid absorption studies in amine systems. Meyer monoethanolamine (MEA) with a purity ⩾ 99 % (reagent grade) was used as the absorbent. MEA is a water-miscible liquid that reacts strongly with CO_2, making it widely used in acid gas capture processes. The solutions were prepared using distilled water to avoid interference from impurities. References are available for the refractive index of the saturated and CO_2-free solution for comparison with the experimental tests developed (Navarrete Procopio et al., 2023b).

Methodology

The absorption process is a unit operation used in chemical engineering to separate a liquid solution from a gas mixture (Zarzycki y Chacuk, 2013; McCabe et al., 2005). It is a process carried out in a packed absorption column, where the fluids come into contact in countercurrent flow, allowing the gas to be absorbed into the solution (Khan, 2023). This operation is the most widely used method for post-combustion CO_2 capture due to its high capture efficiency and mature technology (Wang et al., 2011; Soo et al., 2024).

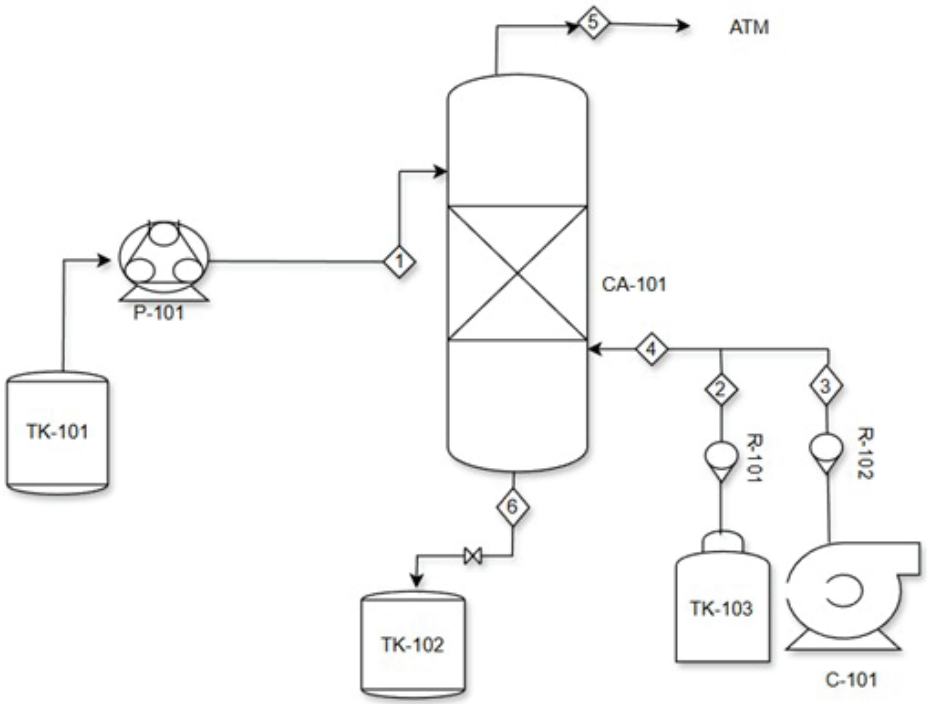
The liquid absorbent solution is a mixture of water and monoethanolamine (H_2O + MEA) at different concentrations (10 %, 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % w/w) and the gaseous solution is a mixture of air and carbon dioxide (air + CO_2) in order to operate at CO_2 concentrations from thermoelectric power plants (12.5 % and 5 % v/v CO_2).

The absorption system used at the laboratory scale consists of an acrylic absorption column (CA-101) packed with ½-inch Berl mounts. The absorbent solution is prepared and stored in the TK-101 tank, from where it is fed into the system by a peristaltic pump (P-101) through *stream* 1. The gas feed consists of CO_2 from the TK-103 tank and compressed air from the C-101 compressor. The proportions of the gas mixture are regulated by two rotameters (R-101 and

R-102): one for controlling the air flow and the other for controlling the CO_2 flow. Upon entering the column, the H_2O–MEA liquid mixture comes into contact with the gas, facilitating CO_2 absorption. The treated gas, composed mainly of air, is discharged into the atmosphere at the top of the system through *stream* 5, where a gas analyzer measures the CO_2 concentration at the process outlet. At the bottom of the column, *stream* 6 stores the saturated MEA-H_2O-CO_2 liquid solution, which is collected in tank TK-102 for subsequent treatment in the desorption stage. Additionally, the system has four temperature sensors in *streams* 1, 4, 5, and 6, enabling continuous thermal monitoring of the absorption process.

In the column, the absorbent solution gets in contact at counterflow with the gas *stream*. The MEA solution reacts with the CO_2 in the gas *stream*. The

Figure 1. Diagram of absorption process



reaction between the MEA and CO_2, according to the literature (Kittel, 2009), represents the absorption reaction mechanism:

$$2\ mol\ MEA \rightarrow 1\ mol\ CO_2 \qquad \text{Ec. (1)}$$

Results

According with ec.1, 2 mol MEA absorbs 1 mol of CO_2, this reaction is exothermic, which indicates that it generates heat. The solution is saturated when it reaches a maximum temperature increase, after which the temperature decreases. Figure 2 shows the saturation of the MEA-H_2O solution at different concentrations (10 %, 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % w/w) at 12.5 % CO_2, in which the temperature behavior during the experiment can be observed.

Figures 2 and 3 show the saturation of the MEA-H_2O solution at different concentrations (10 %, 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % w/w) at 12.5 % and 5 % CO_2.

Figure 2. Saturation test at 12.5 % v/v CO_2

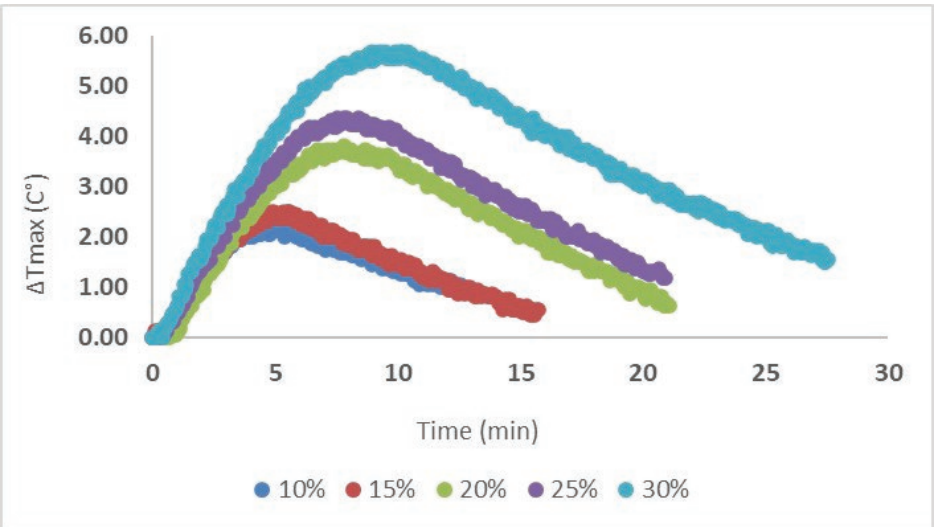
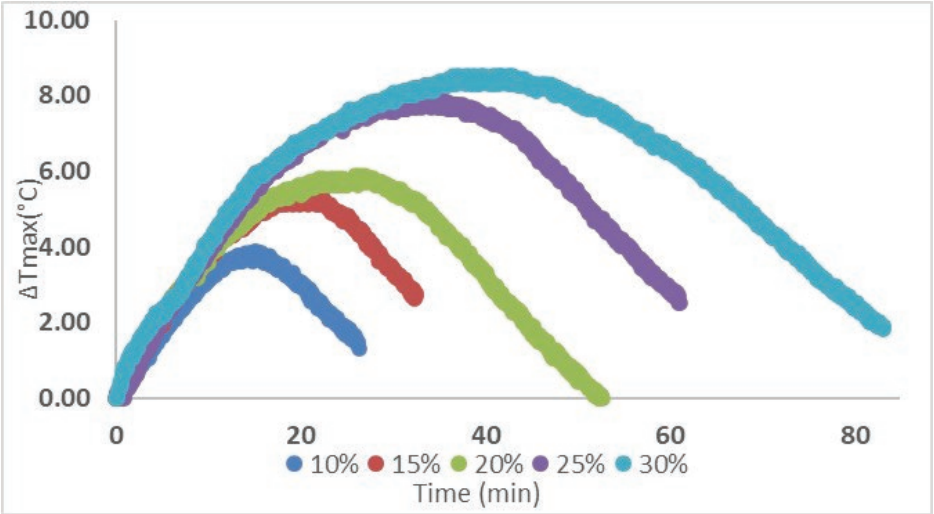


Figure 3. Saturation test at 5 % v/v CO_2



Both figures show the behavior described above: a maximum temperature differential is reached at different times for each concentration, then decreases.

The saturation time of the MEA–H_2O solution is calculated from ec. 1, and the absorption capacity is determined by the stoichiometry of the process, considering that two moles of MEA react with one mole of CO_2. Therefore, the times vary according to the concentration of MEA and CO_2.

The amount of MEA available is obtained from the concentration of the solution and converted to moles, which is used to calculate the maximum number of moles of CO_2 that can be absorbed. The molar flow of CO_2 is determined using the ideal gas law under operating conditions. Finally, the saturation time is defined as the ratio of the total moles of CO_2 the solution can absorb to the molar flow of CO_2. Therefore, this time increases with MEA concentration and decreases with increasing CO_2 flow.

Tables 1 and 2 show a comparison of the theoretical and experimental saturation times of MEA-H_2O solutions (10 %, 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % w/w) at 12.5 % and 5 % CO_2 concentrations. Both tables show that the solution becomes saturated, as they present Δ_T a similar time.

Table 1. Comparison between theoretical and experimental saturation time at 12.5 % v/v CO_2

Concentration %	Theoretical saturation time (min)	Experimental saturation time (min)
10	5.41	6.10
15	8.12	9.03
20	11.43	11.43
25	14.02	14.02
30	17.05	17.05

Continuous tests were performed, which consist of saturating the ab-

Table 2. Comparison between theoretical and experimental time at 5 % v/v CO_2

Concentration %	Theoretical saturation time (min)	Experimental saturation time (min)
10	13.53	15.00
15	20.30	19.63
20	27.07	26.27
25	33.84	33.20
30	40.80	40.80

sorption column and determining the operating flow in relation to the saturation tests (saturation times), which allow the column to be fed. During saturation, the temperature increases until it reaches a Δ_T. Once saturated, the temperature remains constant, indicating that the solution feeding the column is saturated. Table 3 shows the operating flows for the continuous experimental tests. The peristaltic pump has an efficiency of 80 %. The theoretical flow was corrected by multiplying it by this factor to obtain the actual operating flow, which was used during the continuous-process experimental tests.

Table 3. Continuous process flows to 12.5 % and 5 % CO_2

Concentration CO_2 % vol.	Concentration MEA wt. %	Theoretical flow (mL/min)	Peristaltic pump flow (mL/min)
12.5 %	10	33.53	27
	15	21.67	22
	20	20.31	16
	25	16.26	13
	30	13.3	11
5 %	10	15.77	13
	15	10.32	8
	20	7.54	6
	25	5.94	5
	30	4.88	4

Figure 4. Saturation continuous test at 10 % MEA 5 % v/v CO_2

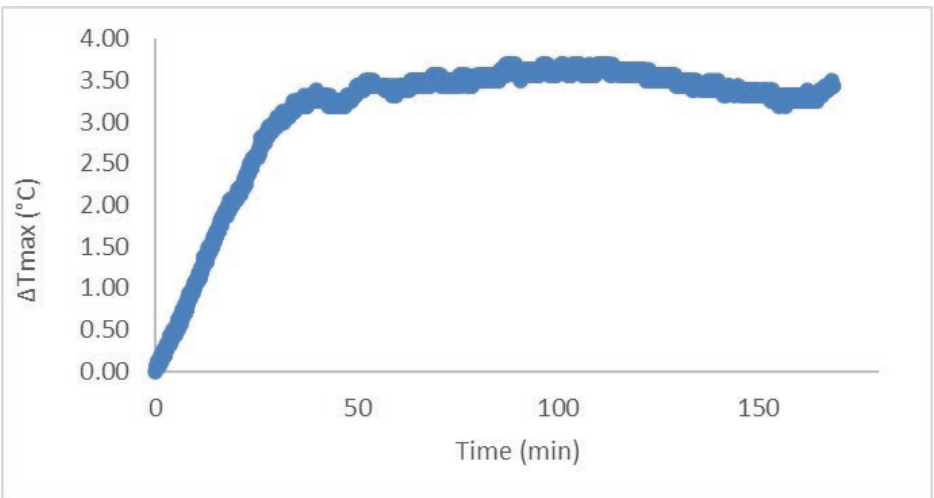


Figure 4 shows the behavior of a test at 10 % MEA-H_2O and 5 % de CO_2 v/v. Temperature increases until reach a Δ_T The temperature is then maintained at a constant level, indicating the saturation of the solution supplied to the column.

Conclusions

Experimental results were obtained to saturate the absorbent solutions at different chemical compositions of MEA 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, and 30 % w/w MEA and 12.5 % and 5 % v/v CO_2 in the gas *stream*, similar to the CO_2 compositions from fuel combustion in a carbon power plant and a combined cycle power plant. The experimental results show an increase in the absorbent solution temperature to a maximum value (Δ_T), followed by a progressive decrease over time. This behavior is characteristic of the exothermic chemical absorption of CO_2, and the decrease in temperature indicates that there are no more MEA molecules available to absorb CO_2, demonstrating solution saturation. Furthermore, the comparison between theoretical and experimental saturation times reinforces the validity of the results, confirming that the saturation methodology is appropriate given the MEA and CO_2 concentrations in the gas *stream*.

References

Comisión Federal de Electricidad. (2023). *Informe anual 2023*. CFE: Ciudad de México, México, 2023.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (S. f.). *Gases y compuestos de efecto invernadero*. Gobierno de México.

Khan, U., Ogbaga, C. C., Abiodun, O. O., Adeleke, A. A., Ikubanni, P. P., Okoye, P. U., y Okolie, J. A. (2023). Assessing absorption-based CO_2 capture: Research progress and techno-economic assessment overview. *Carbon Capture Science & Technology, 8*, 100125. https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100125

Kittel, J., Idem, R., Gelowitz, D., Tontiwachwuthikul, P., Parrain, G. y Bonneau, A. (2009). Corrosion in MEA units for CO_2 capture: Pilot plant studies. *Energy Procedia, 1*(1), 791-797. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.105

McCabe, W. L., Smith, J. C. y Harriott, P. (2005). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

National Geographic. (S. f.). *Gases de efecto invernadero: qué son y cuáles son sus efectos*. https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/que-son-los-gases-de-efecto-invernadero-y-cuales-son-sus-efectos_25682

Navarrete Procopio, M., Urquiza, G. y Castro, L. (2023a). Analysis of Absorber Packed Height for Power Plants with Post-Combustion CO_2 Capture. *Sustainability, 15*(12), 9536. https://doi.org/10.3390/su15129536

Navarrete Procopio, M., Urquiza, G., Castro, L. y Zezatti, V. (2023b). Saturation of the MEA solution with CO_2: Absorption prototype and experimental technique. *Results in Engineering, 19*, 101286. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101286

Savoldelli, E. y Ravelli, S. (2024). Evaluating the Impact of CO_2 Capture on the Operation of Combined Cycles with Different Configurations. *Energies, 17*(14), 3501. https://doi.org/10.3390/en17143501

Songolzadeh, M., Soleimani, M., Ravanchi, M. T. y Songolzadeh, R. (2014). Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions. *The Scientific World Journal, 2014*, 828131. https://doi.org/10.1155/2014/828131

Soo, X. Y. D., Lee, J. J. C., Wu, W., Tao, L., Wang, C., Zhu, Q. y Bub, J. (2024). Advancements in CO_2 capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. *Revista de Utilización del CO2, 81*, 102727. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727

Subramanian, N. y Madejski, P. (2023). Analysis of CO_2 capture process from flue-gases in combined cycle gas turbine power plant using post-combustion capture technology. *Energía, 282*, 128311. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128311

Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J. y Ramshaw, C. (2011). Post-combustion CO_2 capture with chemical absorption: A state-of-the-art

review. *Chemical Engineering Research and Design, 89*(9), 1609-1624. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.005

Zarzycki, R. y Chacuk, A. (2013). *Absorción: fundamentos y aplicaciones*. Elsevier.

Novel stainless steel forged and nitrided for heat pumps generators

Ricardo Reyes Hernández,[a] Víctor Manuel Zezatti Flores,[a*] David Juárez Romero,[a] Ángel Tlatelpa Becerro,[b] Miriam Navarrete Procopio,[c] Erick Omar Castañeda Magadán[c]

Abstract

Novel 18Cr-18Mn steel is a steel created by General Electric for Generator retaining rings; its main characteristic, for which it was developed, is that it is not susceptible to stress corrosion cracking. The main problem with heat pump generators is corrosion. Over the years, there have been serious failures due to stress-corrosion cracking, pitting, and fouling in the casings and tubes of steam generators. In this work, a forged and nitride 18Cr-18Mn steel will be developed, and its corrosion properties will be characterized in a LiBr + H_2O electrolyte. A heat exchanger will be manufactured and installed in a heat pump, with records of the visual inspections performed.

Keywords: novel stainless steel, forged and nitride, generators.

Introduction

Heat pumps are employed across a broad spectrum of applications, including power generation, water purification and desalination, and various processes within sustainable and renewable industries. Water remains an essential resource for human activity; however, despite approximately 75 % of the Earth's

[a] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[b] Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.
[c] Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías, UAEM.
[*] Corresponding author: zezatti@uaem.mx

surface being covered by water, only about 2.5 % is available as freshwater. Global research efforts are therefore focused on seawater desalination processes to enable the utilization of this resource. Various methods of destruction exist, including heat pump-based systems, which are among the most efficient. Heat pumps incorporate heat exchangers as key components of their operation. For optimal performance, these units must remain free of fouling and corrosion products resulting from the degradation of the metallic materials from which they are manufactured, primarily stainless-steel alloys. Figure 1 shows a desalination plant that employs heat pump systems.

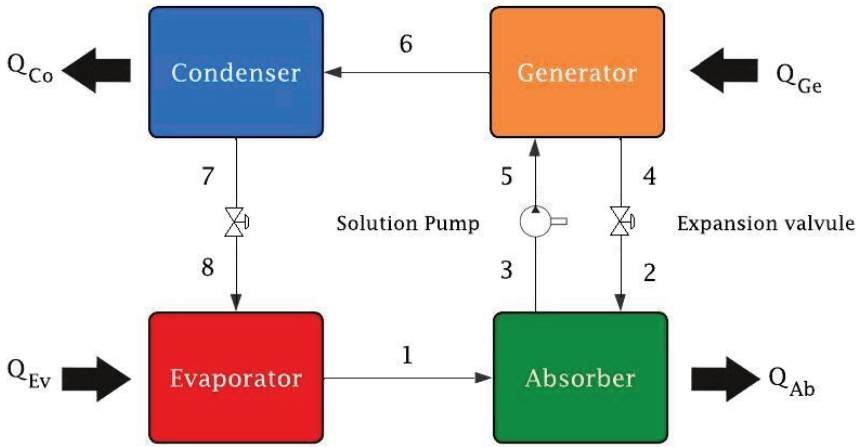
These systems must operate under optimal conditions and are employed as clean energy sources, ensuring efficient and reliable performance.

The main components of heat pumps include a generator, an evaporator, a condenser, and an absorber. These units enable heat transfer from the working fluid to generate water vapor, which is then condensed. In many cases, operating temperatures can reach elevated levels, requiring materials capable of withstanding such conditions (Luo & Su, 2013; Zhang et al., 2020). Figure 2 presents a simplified block diagram for a basic absorption heat pump.

Figure 1. A desalination plant



Figure 2. Simplified block diagram for a basic absorption heat pump



A variety of working fluids may be employed in these systems, ranging from water to highly aggressive (corrosive) substances. As a result, structural materials, particularly steels, are subject to different degrees of degradation, depending on the chemical nature of the working fluids and the operating conditions, including temperature, pressure, and flow velocity. Therefore, the appropriate selection of construction materials is essential to prevent corrosion-related failures, extend equipment service life, and significantly reduce maintenance costs, thereby improving operational efficiency and economic performance (Cho et al., 2019; Li et al., 2021; Popoola et al., 2013; Okonkwo et al., 2020).

All materials degrade, and this phenomenon must be considered in engineering applications. Currently, no material is entirely immune to degradation. Selecting an appropriate material involves mitigating corrosion effects on equipment, ensuring resistance to operating conditions, and selecting materials capable of withstanding the working fluids (e.g., water, chlorides, salts, and acids). AISI 316 stainless steel is commonly used in heat exchangers; however, it is also susceptible to corrosion, albeit to a lesser extent (Tortorelli et al., 1981). For this alloy, Poonguzhali et al. (2015) reported depassivation (breakdown of

the protective passive film on the steel surface) and pitting corrosion, followed by the formation of microcracks (Poonguzhali et al., 2015; Liu et al., 2020).

A critical aspect of heat exchanger design is selecting construction materials with high thermal conductivity to ensure efficient heat transfer between the fluid circulating in the tubes and the fluid on the shell side. Berce noted that the key factors affecting the proper performance of a heat exchanger include design considerations, corrosion inhibitors, protective measures for steel, and appropriate maintenance practices (Berce et al., 2021).

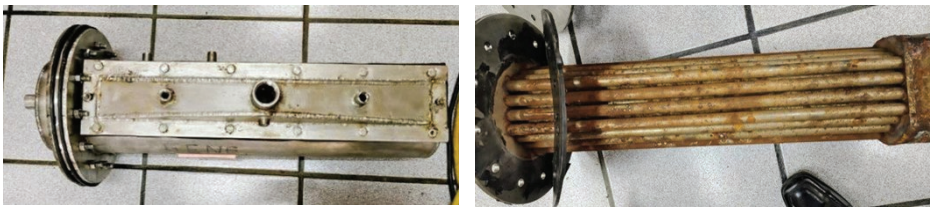
Some researchers prioritize thermal conductivity over other material properties, even at the expense of corrosion resistance. Table 1 summarizes the thermal conductivity values of several materials commonly employed in the fabrication of heat exchangers.

Thermal conductivity generally increases with temperature. Among metallic materials, copper and tungsten exhibit the highest thermal conductivity, whereas steel has significantly lower thermal conductivity. Figure 3 illustrates a shell-and-tube heat exchanger and a section of internal piping showing material degradation.

Table 1. Thermal conductivity of selected materials used in heat exchanger manufacturing

Materials	Thermal conductivity W/ (m*K)
Copper	389
Tungsten	173
Aluminum	160
Galvanized steel	50-60
Steels	45-58
Carbon steel	45
Stainless steel	15-25
Titanium	21.9
18Cr-18Mn steel	15-25

Figure 3. a) Shell and tube heat exchanger, and
b) internal piping exhibiting material degradation



a) b)

The 18Cr–18Mn steel alloy exhibits thermal conductivity comparable to that of conventional steels, along with good formability even at low temperatures and excellent corrosion resistance (Hernandez et al., 2016; Kumar et al., 2020). Some authors prefer austenitic steels to mitigate pitting corrosion, whereas others favor duplex steels to reduce susceptibility to stress corrosion cracking. The 18Cr -18Mn alloy may exhibit either an austenitic or duplex microstructure depending on its chemical composition and processing conditions. Additionally, this alloy has demonstrated high corrosion resistance, with corrosion products forming protective layers that slow further degradation, potentially due to its forging history (Reyes-Hernández et al., 2017; Yang et al., 2022). The 18Cr -18Mn material is a high-chromium stainless steel exhibiting good corrosion resistance. Its use in the manufacture of heat pumps, which are essential components of generators, is advantageous owing to its resistance to stress corrosion cracking (SCC). This implies that the material is not prone to cracking under applied tensile stresses. In such equipment, stress corrosion cracking typically affects the shell and piping, leading to leakage and unintended fluid mixing, which may result in severe operational failures and potentially catastrophic accidents.

Materials and methods

Thermal conductivity is denoted by the symbol k and is expressed in the International System of Units (SI) as W/m*K. The equation used to calculate thermal conductivity is:

$$k = \frac{Q * L}{A * \Delta T * t} \qquad \text{Eq. 1}$$

Where k = thermal conductivity, Q = heat transfer, L = material thickness, A = cross sectional area of the material, ΔT = temperature difference ($T_2 - T_1$), and t = time.

As part of the proposed work, the following activities will be carried out:

1) An experimental 18Cr -18Mn steel will be developed for the fabrication of a heat exchanger. This material is planned to be produced at the Metallurgy Institute of Michoacán, Mexico.

2) Electrochemical tests, including potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy, and electrochemical noise measurements, will be performed on the steel in an H_2O + LiBr electrolyte. A Gill AC potentiostat will be used, employing a silver electrode as the reference electrode and a graphite electrode as the counter electrode.

3) The steel will be forged under a constant nominal force applied over the entire surface; for this purpose, the material will be heated to 1100 °C in a furnace.

4) The material will then be nitrided using a feasible method, such as salt bath nitriding.

5) The heat exchanger will be manufactured using the treated material.

6) The heat exchanger will be tested within a heat pump system over an extended period to evaluate the material's degradation behavior and to identify the dominant corrosion mechanisms. Visual inspections will be performed and documented throughout the testing period.

All these procedures will be conducted in accordance with the scientific method. Based on a comprehensive analysis of experimental results and observed material behavior, it is expected that a suitable material for heat exchanger applications will be developed.

Results

This research is expected to yield a novel steel alloy for heat exchanger applications, exhibiting enhanced resistance to both pitting corrosion and stress corrosion cracking. This material is intended to improve desalination and water purification technologies by extending the service life of heat pump systems and promoting cleaner, more sustainable industrial processes.

Fabrication of the heat exchanger from the developed steel is essential to evaluate the equipment's performance improvements, which will be assessed through periodic visual inspections. The corrosion behavior is inherently difficult to predict, as multiple physical and chemical phenomena occur simultaneously within the heat exchanger. These include spontaneous exothermic reactions that result in abrupt increases in process variables, such as pressure, temperature, and fluid velocity. Such variations may cause sudden changes in the thermodynamic state of the working fluid, occasionally exceeding the equipment's original design limits.

Additionally, the working fluids often exhibit aggressive properties, including highly corrosive solutions, salts, or chlorides that can rapidly degrade metallic materials. Lithium bromide (LiBr), commonly used in absorption systems, may be present in diluted or concentrated forms and at elevated temperatures within the shell side of the heat exchanger. Under such conditions, LiBr -H_2O solutions may generate hydrobromic acid (HBr), significantly increasing the corrosive environment. As temperature rises, the aggressiveness of the working fluid intensifies, accelerating corrosion and promoting erosion -corrosion phenomena as fluid velocity increases. These effects can induce mechanical damage such as cracking under flow-induced stress, potentially leading to leakage within the tube bundle.

Furthermore, erosion or tribocorrosion may develop in the upper regions of the shell due to the continuous impingement of water vapor. At the same time, localized pitting corrosion tends to develop at the bottom of the shell due to chloride ion accumulation. In desalination systems, salt concentration increases within the generator, thereby intensifying pitting corrosion.

The developed material is expected to exhibit a predominantly austenitic phase, which is known to provide superior resistance to pitting corrosion. Electrochemical testing will be conducted to confirm this behavior. As part of future work, numerical simulations using ANSYS *software* are planned to model fluid behavior within the system; however, accurately predicting exothermic reactions within a finite volume remains challenging. Additionally, data-driven approaches such as neural network -based modeling will be explored to enhance predictive capabilities. Figure 4 illustrates the occurrence of pitting corrosion and erosion mechanisms observed in heat exchangers.

Figure 4. The occurrence of pitting corrosion and erosion mechanisms is observed in heat exchangers.



Conclusions

Considering the results obtained in this study, the following conclusions can be drawn:

1) All steels used to date in heat pump equipment have exhibited some degree of corrosion.
2) Various steel grades have been investigated to more effectively mitigate corrosion damage affecting both the tubes and the shell of heat exchangers.
3) The interactions between the working fluid and both the tube and shell materials constitute a critical factor in the selection of appropriate construction materials.
4) Fluid velocity, flow regime (laminar or transitional), operating temperature, and internal working pressures within both the shell and the tubes must be carefully considered during the design stage.
5) Multiple factors influence the design of a heat exchanger, and the most critical parameters are ultimately defined by the specific operational requirements established by the end user of the heat pump system.
6) According to the studies conducted on the novel 18Cr -18Mn steel, this alloy demonstrates strong potential for use in the fabrication of heat exchangers, providing satisfactory thermal and corrosion performance.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas of the Universidad Autónoma del Estado de Morelos for their support.

References

Berce, J., Zupančič, M., Može, M., & Golobič, I. (2021). A review of crystallization fouling in heat exchangers. *Processes, 9*(8), 1356. https://doi.org/10.3390/pr9081356

Cho, Y., Han, S., Seo, H., Shin, M., Woo, S., & Jeong, S. (2019). Corrosion and inhibition process of carbon steel in LiBr-H_2O solution. *Journal of Mechanical Science and Technology, 33*(6), 2995-3000. https://doi.org/10.1007/s12206-019-0549-x

Hernandez, R. R., Torres-Islas, A., Serna, S., Bedolla, A., Molina, A., Colin, J., & Martinez, H. (2016). Corrosion Behavior of 18Cr-18Mn Hot-Forged and Plasma-Nitrided Steel. *Journal of Advanced Electrochemistry*, 117-120.

Kumar, S., Singh, R., & Sharma, A. (2020). Surface modification and corrosion resistance of stainless steels: A review. *Surface and Coatings Technology, 397*, 125986. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125986

Li, Y., Zhang, J., Chen, Y., & Wang, L. (2021). Corrosion behavior of carbon steel in LiBr-H_2O solution under different operating conditions. *Journal of Materials Research and Technology, 15*, 4321-4331. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.021

Liu, Y., Wang, X., & Zhang, Y. (2020). Corrosion fatigue behavior of austenitic stainless steels in chloride-containing environments. *Engineering Failure Analysis, 115*, 104629. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104629

Luo, C., & Su, Q. (2013). Corrosion of carbon steel in concentrated LiNO3 solution at high temperature. *Corrosion science, 74*, 290-296. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.05.001

Okonkwo, P. C., Adebayo, A. K., & Alabi, A. O. (2020). Corrosion challenges in oil and gas production systems: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering, 191*, 107154. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107154

Poonguzhali, A., Pujar, M. G., Mallika, C., & Mudali, U. K. (2015). Corrosion fatigue behavior of 316LN SS in acidified sodium chloride solution at applied potential. *JOM, 67*(5), 1162-1175. https://doi.org/10.1007/s11837-015-1292-0

Popoola, L. T., Grema, A. S., Latinwo, G. K., Gutti, B., & Balogun, A. S. (2013). Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation. *International Journal of Industrial Chemistry, 4*(1), 35. https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-35

Reyes-Hernández, R., Torres-Islas, A., Serna, S., Molina-Ocampo, A., Coli, J., & Bedolla, A. (2017). Austenite and forging effects on 18Cr-18Mn stainless steel impedance. *South African Journal of Chemistry, 70*, 108-112. https://doi.org/10.17159/0379-4350/2017/v70a15

Tortorelli, P. F., DeVan, J. H., & Keiser, J. R. (1981). Corrosion of type 316 stainless steel in molten LiF-LiCl-LiBr. *Journal of Nuclear Materials, 103*, 675-680. https://doi.org/10.1016/0022-3115(82)90676-6

Yang, S., Li, Z., & Chen, Y. (2022). Failure analysis of heat exchanger tubes in petrochemical industry under corrosive environments. *Engineering Failure Analysis, 134*, 106058. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106058

Zhang, X., Wang, Z., Li, X., & Zhang, H. (2020). Corrosion behavior of carbon steel in molten nitrate salts for thermal energy storage applications. *Corrosion Science, 170*, 108688. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108688

Diseño y optimización de un aerogenerador utilizando polímeros reciclados para la construcción de los álabes

Luis Manuel Valverde Cedillo,[a*] Oscar Odin Trujillo Letechipia,[a] Yonathan Sanchez Bailon[a]

Abstract

This paper describes the design, fabrication, and preliminary evaluation of a wind turbine using recycled polymers for the blades as an alternative to conventional materials used in wind energy systems. The project was developed using an experimental-technological methodology that included re-engineering processes, CAD modeling, mold making, component printing, and the assembly of a functional prototype. A support structure and a test bench were also designed and built to analyze the wind turbine's behavior under different airflow conditions. The results obtained allowed the observation of the system's initial performance in terms of rotational speed and voltage generation, providing relevant information for future improvements in design, efficiency, and the application of recycled materials in small-scale wind energy generation systems.

Keywords: Wind turbine, recycled polymers, wind energy, CAD design, experimental prototype, renewable energy.

Introducción

La necesidad de los combustibles fósiles fomenta la adopción de la energía eólica como alternativa sustentable (Medina Jiménez, 2025). Tradicionalmente, las palas de los aerogeneradores se fabrican con materiales compuestos basados en fibra de vidrio, cuyo manejo de residuos o reciclaje es complejo (Castilla Baylos,

[a] Ingeniería Electromecánica, Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco.
[*] Autor de correspondencia: luis_vc@tesch.edu.mx

2020). Sin embargo, se investiga el uso de materiales que aumenten la vida útil, la resistencia y la eficiencia de los álabes, con el fin de apoyar la innovación tecnológica y aportar al cumplimiento de las metas nacionales en materia de energía y cambio climático definidas en los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) (De la Garza, 2019).

Este proyecto describe brevemente la fabricación de álabes para un aerogenerador (Piggott, 2009), utilizando técnicas de reingeniería para diseñar una hélice de PLA (Rampérez Barrajón, 2021). Se evaluará el comportamiento aerodinámico de los álabes con materiales reciclados en un banco de pruebas, con el objetivo de validar y optimizar su desempeño en la generación eólica (Richmond Navarro et al., 2022).

Materiales y metodología

El proyecto se desarrolló en las instalaciones del taller de ingeniería mecánica del Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, ubicado en La Candelaria Tlapala, municipio de Chalco, Estado de México. El proyecto se desarrolló bajo un enfoque experimental y tecnológico orientado a la aplicación práctica, mediante la construcción de un álabe para un aerogenerador y la elaboración del banco de pruebas correspondiente.

Para la fabricación del álabe, se efectuó una visita al plantel de la Universidad del Valle de México (UVM) campus Coyoacán, donde se obtuvo la autorización para utilizar una de las hélices de su aerogenerador. A partir de ello, se procedió a elaborar un molde de fibra de vidrio, el cual posteriormente fue trasladado a la institución (Figura 1). Dicho molde fue lijado con el propósito de mejorar su superficie y sus relieves, a fin de obtener un mejor acabado. Posteriormente, se llevó a cabo su digitalización mediante un escáner tridimensional, utilizando un dispositivo Kinect de la consola Xbox 360 y el *software* Skanect para la captura y el procesamiento de la geometría tridimensional (Figura 2). La geometría obtenida se exportó al *software* CAD SolidWorks para su modelado, en el que se estableció el ángulo de inclinación más adecuado para la captación del viento y se generó el plano de la hélice con sus respectivas vistas (Figura 3).

El modelo se imprimió en tres secciones debido a las dimensiones de la cama de impresión de la Bambu Lab X1 Carbon, la cual cuenta con una altura máxima de 25.6 cm, mientras que la hélice presenta una longitud aproximada de 60 cm. Esta división permitió incorporar un refuerzo interno de aluminio, lo que incrementó su resistencia estructural. Asimismo, se diseñaron y posteriormente se imprimieron el mamelón y la góndola del aerogenerador (Figura 4).

Por otra parte, la estructura del banco de pruebas, donde se montó el aerogenerador, fue donada por la institución. Está construida con perfil tubular cuadrado (PTR) de 3 cm × 3 cm y fue adaptada para asemejarse al boceto original (Figura 5), garantizando una instalación adecuada y estable durante las pruebas.

En el ensamble del banco de pruebas del aerogenerador (Figura 6), se empleó un generador de corriente directa de 24 V y 250 W a 2750 RPM, a pesar de requerir altas revoluciones, el banco presenta baja resistencia mecánica. Con este generador se realizaron las pruebas correspondientes; sin embargo, el sistema permite la adaptación de otros modelos de generadores según las necesidades del ensayo. Asimismo, se incorporó un ventilador industrial tipo tambor, donado por la empresa Comisión Federal de Electricidad, equipado con un motor trifásico de 1700 RPM. Adicionalmente, se integró un panel solar de 72 celdas de silicio policristalino, con una potencia máxima de 200 W. Finalmente, se instaló una batería para el resguardo de energía, el soporte estructural del banco de pruebas se montó sobre cuatro llantas con sistema de bloqueo. Estas cuentan con cubierta de poliuretano para absorber impactos y vibraciones, además de permitir una rotación de 360°, lo que facilita su desplazamiento y garantiza estabilidad durante las pruebas.

En el tablero de instrumentación (Figura 7), se acopló un variador de frecuencia a dicho motor que permitió modular el caudal de aire y obtener diferentes mediciones conforme a la velocidad del viento simulada. El sistema cuenta con control completo de arranque y paro, lo que facilita la operación segura y precisa del equipo durante las pruebas experimentales. De igual forma, se instalaron tacómetros marca Generic, con un rango de medición de 10-9999 RPM y pantalla LED roja de cuatro dígitos. Estos equipos fueron alimentados mediante una fuente de poder de 12 VCD, marca SFire, modelo PL-CD-1000. Además, se

incorporó un controlador para el generador y otro para el panel solar. Uno de los sensores del tacómetro se colocó en el generador y otro en el ventilador, lo que permitió monitorear las revoluciones por minuto de ambos durante las pruebas experimentales. Se utilizó un controlador solar modelo XY-L30A, con tensión nominal de 12/24 VCD, corriente nominal de 30 A, voltaje máximo de 46 VCD y potencia máxima de entrada de 390 W (12 VCD) y 780 W (24 VCD). Asimismo, se empleó un controlador de turbina eólica de la marca W88-C, con tensión nominal de 12/24 VCD, corriente nominal de 30 A (Figura 8).

Figura 1. Molde de fibra de vidrio obtenido del aerogenerador UVM Coyoacán



Figura 2. Escaneo 3D del molde con dispositivo Kinect y software Skanect



Figura 3. Modelado del álabe en SolidWorks con ajuste del ángulo de inclinación y sus respectivas vistas

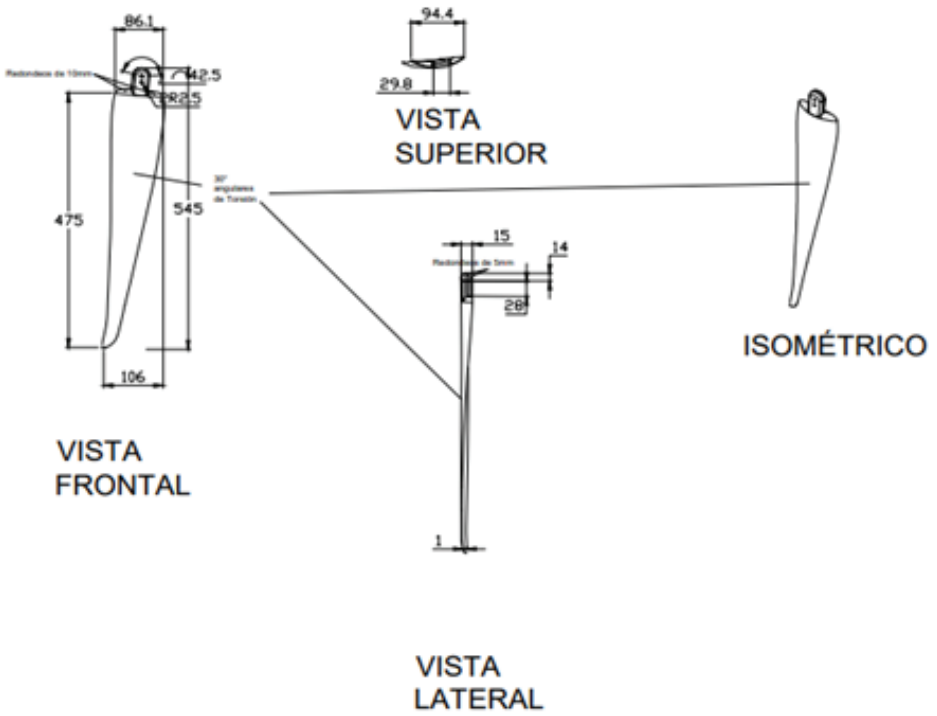


Figura 4. Impresión 3D del mamelón y la góndola del aerogenerador



Figura 5. Boceto del banco de pruebas del aerogenerador



Figura 6. Ensamble del banco de pruebas del aerogenerador



Figura 7. Tablero de instrumentación

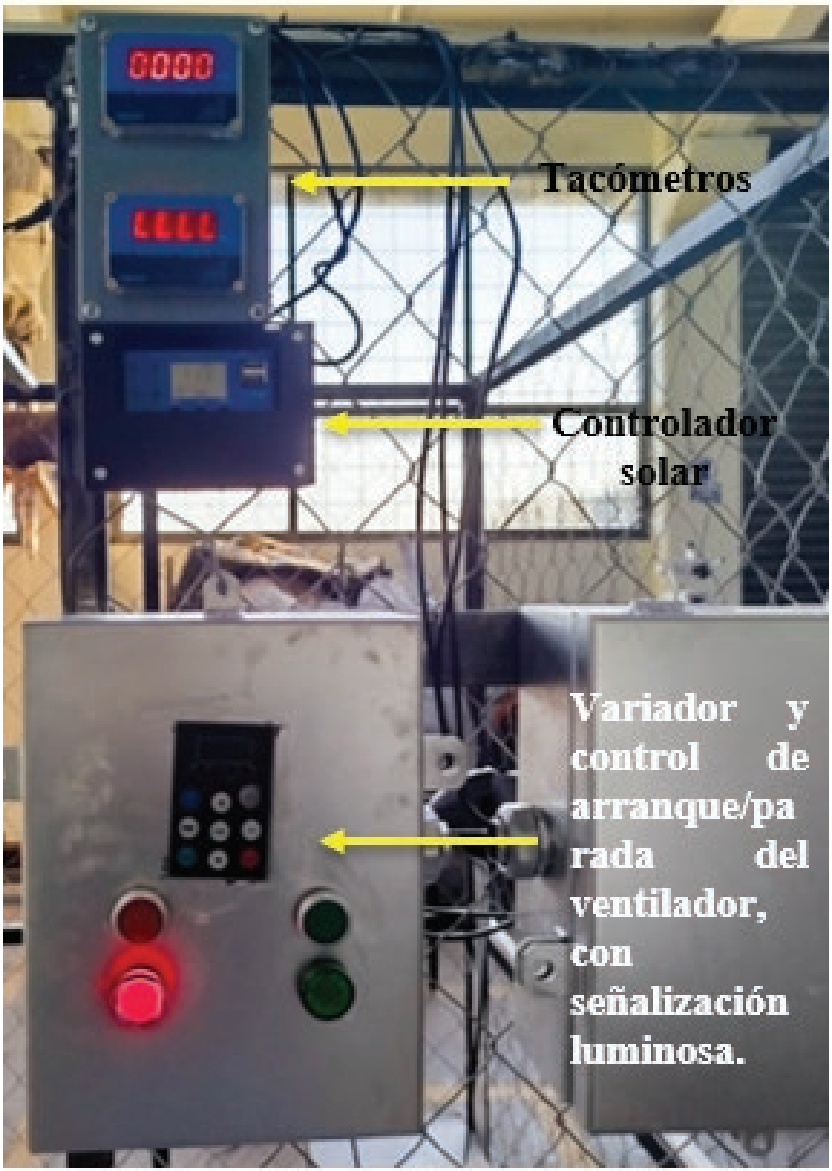


Figura 8. Controlador de turbina eólica

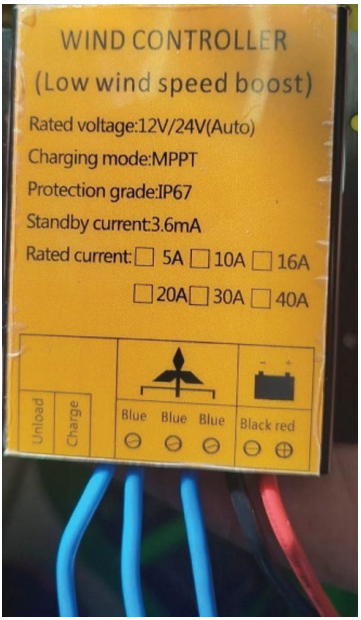


Figura 9. Medición de la energía del panel solar: 11.9 VCD



Figura 10. Primera medición considerando únicamente las RPM del ventilador y el voltaje generado



Figura 11. Cuarta medición considerando únicamente las RPM del ventilador y el voltaje generado



Resultados

El controlador del panel indicó un voltaje de 11.9 VCD (Figura 9). Este se mantiene constante mientras el sistema es alimentado por la radiación solar.

Posteriormente, se realizaron cuatro ensayos experimentales, durante los cuales se varió el caudal del ventilador con el propósito de medir el voltaje generado, las revoluciones por minuto (RPM) del generador, la potencia producida, las RPM del ventilador y el tipo de flujo de aire. Las pruebas fueron documentadas en la Tabla 1. Mientras que la primera medición se presenta en la Figura 10 y la cuarta, en la Figura 11.

Tabla 1. Resultados de las pruebas al variar el caudal del ventilador

Núm. de prueba	Voltaje generado	RPM generador	Potencia generada	RPM ventilador	Tipo de flujo de aire
P-1	5.14 V	590 RPM	12 W	1026 RPM	Transicional
P-2	6.72 V	770 RPM	20 W	1350 RPM	Transicional
P-3	8.03 V	920 RPM	29 W	1580 RPM	Turbulento
P-4	9.11 V	1045 RPM	38 W	1763 RPM	Turbulento

Conclusiones

Se determinó que el diseño del aerogenerador es mecánicamente viable, logrando la rotación de los álabes fabricados con polímeros reciclados y la generación de voltaje conforme aumentaba el caudal, como se muestra en los resultados de la Tabla 1. No obstante, el rendimiento obtenido se encuentra por debajo de los estándares de los generadores convencionales, lo que señala áreas de oportunidad en la optimización del prototipo.

Con el fin de optimizar la eficiencia del sistema, se determinó la necesidad de incorporar un generador de mayores prestaciones y perfeccionar la

aerodinámica de las hélices mediante una impresión unificada. Asimismo, se recomienda el uso de un túnel de viento cerrado con un motor de mayor potencia, a fin de optimizar la incidencia del flujo de aire.

Se concluye que, a pesar de que las limitaciones presupuestarias que afectaron la selección de componentes y acabados, el diseño cumple con su propósito funcional mediante el empleo de materiales reciclados en la estructura de los álabes.

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México y al Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco por el espacio y el respaldo institucional brindados. A todas las personas que hicieron posible este proyecto mediante sus donaciones, así como por el apoyo proporcionado a través de sus conocimientos y orientación. A los docentes por el acompañamiento brindado y a quienes, desde el ámbito personal y académico, nos brindaron su apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Referencias

Castilla Baylos, M. (2020). *Fibras limpias procedentes del reciclado*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

De la Garza, M. L. (2019). *Los programas nacionales estratégicos (PRONACES)*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Medina Jiménez, A. (2025, agosto). La transición del uso de energías fósiles a energías limpias. ¿Un cambio de innovación disruptivo? *Espacio Científico de Contabilidad y Administración*, 141-162.

Piggott, H. (2009). *Manual de autoconstrucción de generadores eólicos*. Scoraig Wind Electric.

Rampérez Barrajón, J. (2021). *El ácido poliláctico (PLA): un material innovador en la actualidad*. Claraboyas.es.

Richmond Navarro, G., Fallas Hernández, E. y Padilla Barrientos, J. (2022). Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo. *Tecnología en Marcha*, 178-193.

Sistema de control ambiental con ESP32-CAM para bodegas agrícolas

Jared Roberto Morales Urueña,[a] Yael Alonso Portillo Urueña,[a*] Ángel David Díaz Damián,[a] Ángel Yahir Morales Reyes,[a] José María Servín Olivares[a]

Abstract

Inadequate storage conditions in agricultural warehouses lead to significant postharvest losses. This project developed a low-cost IoT-based environmental control system using an ESP32-CAM microcontroller to address this challenge. The prototype integrates DHT11 and LDR sensors for monitoring temperature, humidity, and light, alongside a camera for real-time visual surveillance. Relay-controlled actuators (fans and lights) enable automated environmental regulation. Data is accessible through a local web interface, with automated Telegram notifications triggered when thresholds are exceeded. The system was assembled on a perforated board and housed in a custom 3D-printed casing. Functional testing demonstrated reliable sensor readings, stable video *streaming*, and effective alert mechanisms. A cost-benefit analysis confirms this solution offers functionalities comparable to commercial systems at minimal expense. This accessible IoT tool enables proactive monitoring and control, representing a viable technological option for reducing grain deterioration in small to medium-scale agricultural storage facilities.

Keywords: Internet of Things (IoT), ESP32-CAM, postharvest monitoring, environmental control, agricultural storage, smart sensor system.

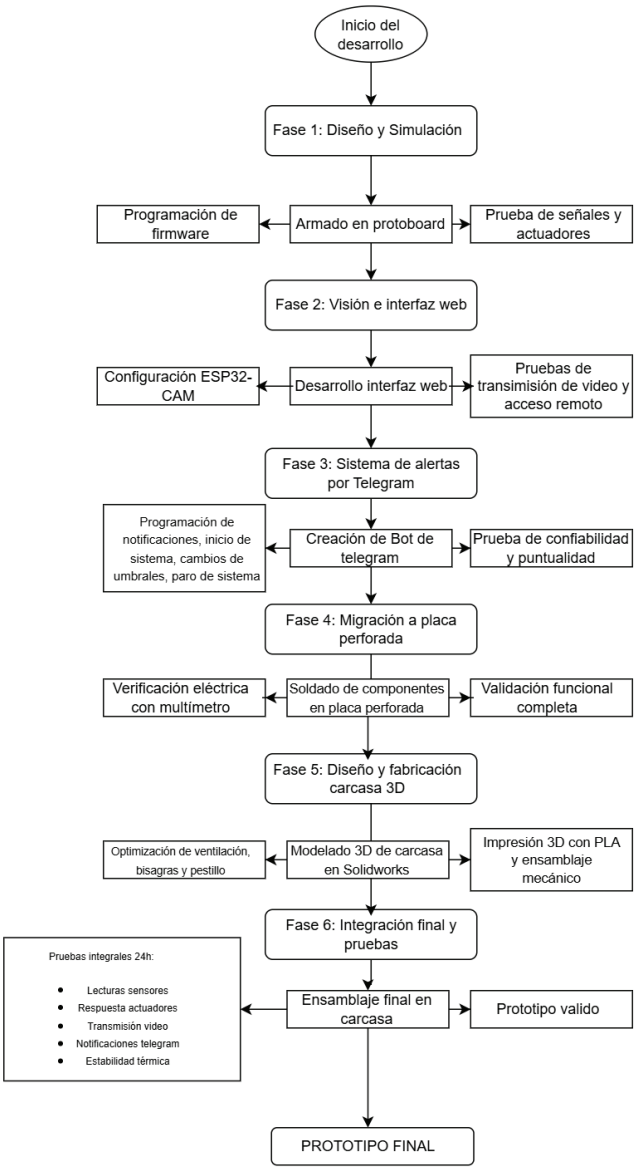
[a] Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.
[*] Autor de correspondencia: yael.portillo@uaem.edu.mx

Introducción

La conservación de granos y materias primas agrícolas en bodegas de almacenamiento representa una etapa esencial en la cadena agroindustrial. Factores ambientales como la temperatura y la humedad relativa afectan directamente la calidad del producto, acelerando procesos de deterioro y favoreciendo la proliferación de hongos e insectos, lo que resulta en pérdidas económicas considerables (Blanco Valdes et al., 2016; Kumar y Kalita, 2017). Estas pérdidas son especialmente significativas para pequeños y medianos productores, quienes a menudo carecen de acceso a sistemas de monitoreo avanzados debido a sus altos costos (Banerjee et al., 2020; Talpur et al., 2021).

El estado del arte en la gestión inteligente de almacenes muestra una creciente adopción del internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Se han desarrollado sistemas basados en microcontroladores como Arduino y ESP8266/ESP32, equipados con sensores (DHT11, DHT22) para la adquisición de datos y conectividad Wi-Fi para su transmisión a interfaces web o móviles (Acevedo, 2023; Lydia et al., 2022; Pratama et al., 2024; Tovar Soto et al., 2019). Muchas de estas implementaciones presentan limitaciones, como la falta de supervisión visual integrada, la ausencia de mecanismos de alerta práctica (como la mensajería instantánea) y diseños que no son lo suficientemente robustos para entornos agrícolas reales (Nuno-Maganda et al., 2024; Peña de Loza et al., 2024). La variante ESP32-CAM, que integra una cámara, representa una oportunidad para superar estas carencias, permitiendo el monitoreo ambiental y visual en un solo dispositivo compacto (Nowroz et al., 2025; Random Nerd Tutorials, 2024). Con la finalidad de atender estas necesidades se desarrolló una solución integral de control ambiental basado en IoT utilizando el módulo ESP32-CAM. El sistema propuesto unifica la medición continua de variables ambientales (temperatura, humedad, luminosidad) con capacidades de visión en tiempo real, control automático mediante actuadores (ventilación, iluminación) y un sistema de alertas proactivas a través de Telegram. Esta propuesta busca proporcionar una alternativa tecnológica, accesible y de bajo costo, que garantice condiciones óptimas de almacenamiento en bodegas agrícolas, contribuyendo a la reducción de las pérdidas postcosecha.

Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento realizado para el desarrollo del sistema de control ambiental con ESP32-CAM



En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento metodológico para el desarrollo del sistema de control ambiental con ESP32-CAM, que incluye las seis fases interconectadas del desarrollo: diseño y simulación en *protoboard*; integración de visión e interfaz web; implementación de alertas por Telegram; migración a placa perforada; diseño y fabricación de la carcasa 3D, y la integración final con pruebas de validación.

Materiales y métodos

El desarrollo del prototipo se realizó mediante una metodología estructurada en fases secuenciales, que incluyó el diseño del circuito, la programación del *firmware*, el ensamblaje electrónico y el diseño mecánico de la carcasa. Los materiales utilizados en el desarrollo del prototipo se detallan en la Tabla 1, donde se especifican sus modelos y funciones principales dentro del sistema.

Tabla 1. Materiales usados para el sistema

Material/Componente	Modelo/Especificación	Descripción/Función
Módulo de procesamiento	ESP32-CAM con cámara OV2640	Unidad principal del sistema encargada del procesamiento de datos, adquisición de video en tiempo real y comunicación inalámbrica mediante Wi-Fi para transmisión de información.
Módulo de control y visualización	ESP32 con pantalla TFT	Utilizado para el control del sistema y la visualización local de las variables medidas y el estado de los actuadores.
Sensor de temperatura y humedad	DHT11	Dispositivo encargado de medir de forma continua la temperatura ambiente y la humedad relativa, enviando los datos directamente al microcontrolador.

Tabla 1. Materiales usados... (continuación)

Material/Componente	Modelo/Especificación	Descripción/Función
Sensor de luminosidad	Fotocelda tipo LDR	Dispositivo resistivo cuya variación de resistencia depende de la intensidad luminosa, permitiendo medir la iluminación en el entorno real.
Módulos de relevador	Módulo relé relevador 2 canales a 5 V 10 A low level realy	Permiten la conmutación segura de cargas eléctricas de corriente alterna mediante señales de control de bajo voltaje.
Carga eléctrica 1	Foco de 120 V AC	Utilizado como elemento de iluminación para pruebas del sistema de control.
Carga eléctrica 2	Ventilador de 120 V AC	Empleado como sistema de ventilación para las pruebas de activación automática.
Fuente de alimentación	Fuente de 110/120 V AC a 5 V DC, 3 A	Fuente conmutada utilizada para alimentar de manera estable todos los módulos electrónicos del sistema.
Plataforma de pruebas	Protoboard	Utilizada durante la fase de pruebas para el montaje temporal y verificación del funcionamiento del circuito.
Montaje permanente	Placa perforada	Empleada para la soldadura y fijación definitiva de los componentes electrónicos.
Software de diseño	SolidWorks	Utilizado para el modelado tridimensional de la carcasa del sistema.

Tabla 1. Materiales usados... (continuación)

Material/Componente	Modelo/Especificación	Descripción/Función
Material de impresión 3D	Filamento PLA	Material seleccionado para la fabricación de la carcasa debido a su adecuada resistencia mecánica, facilidad de procesamiento y compatibilidad con tecnologías de manufactura aditiva.

Procedimiento metodológico detallado

El desarrollo del prototipo se ejecutó mediante una metodología secuencial estructurada en seis fases interconectadas, garantizando validación progresiva y optimización en cada etapa.

Diseño, simulación y validación de la lógica de circuito en protoboard

Esta fase inicial constituyó la validación conceptual y eléctrica del sistema. Se realizó el ensamblaje completo del circuito en una *protoboard*, interconectando el microcontrolador ESP32 (con pantalla TFT integrada para visualización local), el módulo ESP32-CAM, los sensores DHT11 (temperatura/humedad) y LDR (luminosidad), módulos de relevador de 5 V para control de cargas de 120 V AC (foco y ventilador), y un *buzzer* activo para alertas audibles. Simultáneamente, se desarrolló y cargó un *firmware* básico en el IDE de Arduino. Este *software* implementó la lógica central: lectura periódica (polling) de los sensores mediante sus respectivas librerías, comparación de valores con umbrales predefinidos almacenados en memoria, control de salidas digitales para activar/desactivar los relevadores, y actualización de la pantalla TFT. La prueba en *protoboard* permitió verificar la estabilidad de las señales, la correcta interpretación de los datos por el microcontrolador, la respuesta inmediata y segura de los actuadores, y la

ausencia de cortocircuitos o sobrecalentamientos, sentando las bases para la implementación física definitiva.

Integración del subsistema de visión y desarrollo de la interfaz web

Con el circuito básico validado, se procedió a la integración avanzada del módulo ESP32-CAM. Se programó específicamente para inicializar el sensor de cámara OV2640 y establecer un servidor web HTTP accesible dentro de la red Wi-Fi generada por el propio dispositivo. Se desarrolló una página web responsiva (utilizando VS Code en el lenguaje de Python) que se sirve desde la memoria flash del ESP32-CAM. Esta interfaz presenta:

- Un panel de control con visualización en tiempo real de los valores numéricos de temperatura, humedad y luminosidad, obtenidos mediante solicitudes al servidor.
- Un visualizador de video en vivo que muestra el stream MJPEG generado por la cámara, permitiendo la supervisión visual remota.
- Controles interactivos para que el usuario pueda, de forma remota, ajustar los umbrales de actuación.

La interfaz se optimizó para ser accesible desde cualquier dispositivo (computadora, teléfono, tableta) conectado a la red del ESP32, sin necesidad de conexión a internet externa, validándose su compatibilidad y baja latencia en múltiples navegadores.

Implementación del sistema de comunicación y alertas mediante Telegram

Para dotar al sistema de capacidad de notificación proactiva e independiente de la interfaz web, se implementó un bot de Telegram. Utilizando la librería UniversalTelegramBot para Arduino, se programó la comunicación bidireccional

con la API de Telegram mediante el *token* único del bot generado en BotFather. El *firmware* se configuró para:

- Notificar eventos del sistema: enviar un mensaje con la dirección IP local asignada y el estado inicial de los sensores al momento del encendido.
- Confirmar interacciones del usuario: responder con un mensaje de confirmación cuando el usuario modifique los umbrales o active manualmente un actuador desde la interfaz web o directamente por un comando de Telegram.
- Generar alertas ambientales: monitorear constantemente las lecturas de los sensores y, al detectar que un valor supera o cae por debajo de los límites configurados, enviar instantáneamente una notificación al chat autorizado. Esta alerta incluye el *timestamp* del evento, el parámetro en violación y su valor exacto.
- Reportar estado del sistema: enviar una notificación en caso de un reinicio inesperado o paro del sistema.

Este subsistema se probó exhaustivamente para garantizar la confiabilidad y puntualidad de las notificaciones bajo diferentes condiciones de conectividad de red.

Migración y optimización del circuito a placa perforada permanente

Una vez validada la funcionalidad completa en el *protoboard*, se procedió a la fabricación de un ensamble electrónico robusto y permanente. Todos los componentes (microcontroladores, zócalos, sensores, conectores de relevador, reguladores de voltaje, bornes de alimentación) se colocaron y soldaron meticulosamente en una placa de circuito impreso universal (placa perforada). Las conexiones eléctricas se realizaron mediante pistas de estaño, siguiendo un diagrama de disposición optimizado para minimizar interferencias y longitud de trazos. Cada conexión se verificó con un multímetro para asegurar continuidad

eléctrica y ausencia de cortocircuitos. Este proceso transformó el prototipo de desarrollo en un módulo electrónico compacto, resistente a vibraciones y listo para su integración mecánica, superando las limitaciones de fragilidad y desconexión propias de la *protoboard*.

Diseño, simulación y fabricación de la carcasa mediante impresión 3D

Se abordó el diseño del sistema mediante el *software* CAD SolidWorks. El modelo 3D de la carcasa se optimizó considerando:

- Compatibilidad dimensional: espacios exactos para alojar la placa perforada, la fuente de alimentación conmutada y los conectores externos.
- Accesibilidad para mantenimiento: se diseñó una tapa superior con bisagras integradas en el mismo modelo CAD, impresas como pieza única, que permite un acceso completo al interior sin herramientas.
- Mecanismo de cierre seguro: se incluyó un pestillo de acción positiva, también impreso en 3D, que garantiza un cierre firme, pero de apertura rápida.
- Gestión térmica: se modelaron rejillas de ventilación estratégicamente ubicadas en las proximidades del ESP32-CAM y los módulos de relevador para favorecer el flujo de aire convectivo y disipar el calor generado.
- Fijación interna: se incluyeron soportes y orificios pasantes para sujetar la placa y la fuente con tornillos, evitando vibraciones.

El archivo STL final se procesó en una impresora 3D (Bambu Lab A1) utilizando filamento PLA, configurando parámetros de capa (0.2 mm) y densidad de relleno (20 %) para lograr un equilibrio óptimo entre resistencia estructural, peso y tiempo de fabricación.

Integración mecánico-eléctrica final y pruebas de validación integral

En la fase final, todos los subsistemas se integraron físicamente:

- La placa perforada y la fuente se fijaron a la base de la carcasa con tornillos.
- Los sensores se posicionaron en los orificios diseñados para ello, asegurando su exposición al ambiente mientras se protegían sus conexiones.
- Los cables de potencia y de los actuadores se canalizaron de manera ordenada y se conectaron a bornes de tornillo para facilitar futuras modificaciones.
- La tapa se cerró mediante el pestillo impreso.

Posteriormente, se ejecutó un protocolo de pruebas integral de 24 horas en un entorno ambiental controlado. Este protocolo evaluó: la estabilidad y precisión de las lecturas de los sensores durante un ciclo prolongado; la respuesta automática y consistente de los actuadores frente a variaciones simuladas de temperatura y humedad; la transmisión continua e ininterrumpida del *stream* de video; la confiabilidad y puntualidad de todas las notificaciones del bot de Telegram, y el perfil térmico interno del dispositivo para descartar sobrecalentamientos. El éxito en estas pruebas confirmó la operatividad confiable y la preparación del prototipo para un eventual pilotaje en condiciones reales.

Herramientas de software *utilizadas*

- Arduino IDE: entorno de desarrollo principal para la programación en C++ del firmware de ambos módulos ESP32 y ESP32-CAM, incluyendo la gestión de librerías para sensores, Wi-Fi, servidor HTTP y Telegram.
- VS Code Pyhton: para el diseño y funcionalidad de la interfaz de usuario web servida por el ESP32-CAM.

- SolidWorks: herramienta CAD empleada para el diseño tridimensional de la carcasa, así como para la modelación sus componentes mecánicos (bisagras, pestillo).

Resultados

En la Figura 2 muestra el prototipo finalmente ensamblado. La carcasa impresa en 3D aloja de manera compacta y segura la placa perforada, los sensores, los módulos de relevador y la fuente de alimentación, permitiendo una fácil instalación y mantenimiento. Por su parte, en la Figura 3 se muestra la interfaz del bot de Telegram, diseñada para la recepción de alertas en tiempo real del sistema. El bot implementado envía notificaciones automáticas en cuatro escenarios principales: al iniciarse el sistema (incluye un mensaje de notificación, cuando

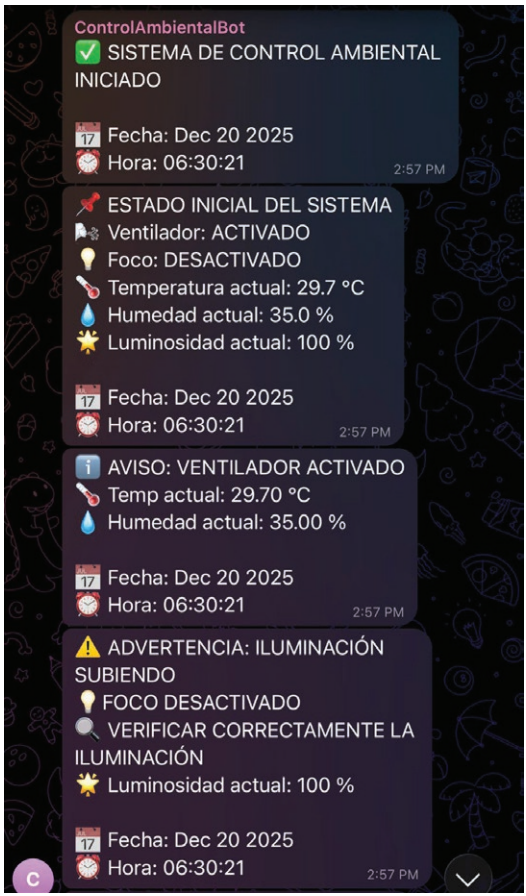
Figura 2. Prototipo final ensamblado



el usuario modifica los umbrales de control, al detectar valores sensados fuera de los rangos configurados (temperatura, humedad o luminosidad) y en caso de paro del sistema. Cada notificación incluye un *timestamp* preciso, el parámetro afectado y el valor exacto registrado, permitiendo una respuesta inmediata ante condiciones adversas en la bodega.

La selección de componentes priorizó el equilibrio costo-rendimiento, resultando en una lista de materiales con un costo total significativamente inferior

Figura 3. Interfaz de Telegram con notificaciones automáticas del sistema de control ambiental



al de sistemas comerciales equivalentes. La implementación del prototipo se logró exitosamente en sus tres dimensiones: *software* (*firmware* funcional con interfaz web y bot de Telegram), *hardware* (circuito soldado estable) y mecánica (carcasa protectora y accesible).

La validación funcional arrojó los siguientes resultados:

- Sensores: los sensores DHT11 y LDR proporcionaron lecturas estables y repetibles de temperatura, humedad y luminosidad, actualizándose cada segundo en la pantalla TFT y la interfaz web.
- Cámara y video: el módulo ESP32-CAM mantuvo una transmisión de video en tiempo real continua y con baja latencia, integrada correctamente en la interfaz web para supervisión visual remota.
- Control y actuadores: los módulos de relevador respondieron de manera precisa a las señales del microcontrolador, activando el ventilador y el foco cuando los valores sensados superaban los umbrales configurados.
- Sistema de alertas: el bot de Telegram demostró confiabilidad al enviar notificaciones automáticas en los tres escenarios programados, inicio del sistema, modificación de umbrales y detección de valores fuera de rango. Las alertas incluían *timestamp* y los valores registrados.

Las pruebas de desempeño y robustez mostraron que el sistema soportó ciclos repetidos de encendido/apagado y operación ininterrumpida por más de 8 horas sin fallos de estabilidad térmica o de conectividad. La carcasa impresa en 3D protegió eficazmente los componentes electrónicos.

Conclusiones

El proyecto concluyó exitosamente con la creación y puesta en marcha de un prototipo funcional de un sistema de control ambiental basado en IoT con ESP32-CAM para bodegas agrícolas. Se cumplió el objetivo general al crear una solución que integra capacidades de monitoreo ambiental (temperatura, humedad, luminosidad), supervisión visual en tiempo real, control automático

mediante actuadores y un sistema de alertas proactivas mediante mensajería instantánea (Telegram). El prototipo demostró, en pruebas de validación en entorno controlado, un funcionamiento estable, confiable y con un ciclo completo de monitoreo-detección-comunicación. El diseño priorizó la accesibilidad económica, utilizando componentes de bajo costo y técnicas de fabricación asequibles (impresión 3D), lo que resulta en una alternativa viable frente a los costosos sistemas comerciales. La solución desarrollada representa un avance hacia la digitalización del sector agropecuario, específicamente en la gestión postcosecha. Al permitir el monitoreo continuo y la respuesta temprana a condiciones adversas, el sistema tiene el potencial de reducir significativamente las pérdidas por deterioro de granos, contribuyendo a una mayor eficiencia económica y sostenibilidad para los productores, en especial los de pequeña y mediana escala.

Agradecimientos

Agradecemos al profesor José María Servín Olivares por la guía y asesoría proporcionada durante el desarrollo de este proyecto.

Referencias

Kumar, D. y Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods, 6*(1), 8. https://doi.org/10.3390/foods6010008

Banerjee, S., Saini, A. K., Nigam, H. y Vijay, V. (2020). IoT Instrumented Food and Grain Warehouse Traceability System for Farmers. *2020 International Conference on Advances in Signal Processing (AISP)*. https://doi.org/10.1109/aisp48273.2020.9073248

Talpur, M. S. H., Khan, S., Oad, A., Sarwar, R., Soomro, A. H., Rehman, H., Talpur, F., Abida Luhrani, A., Talpur, S. H. y Chang, E. S. (2021). IoT Based Grain Storage Monitoring with Android Application. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 10*(2), 1356-1361. https://doi.org/10.30534/ijatcse/2021/1231022021

Tovar Soto, J. P., Solórzano Suárez, J. de los S., & Rodríguez Cainaba, G. O. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: Estado actual. *Lámpsakos*, (22), 86–105. https://www.redalyc.org/journal/6139/613964509009/html/

Lydia, J., Vimalraj S., L. S., Monisha, R. y Murugan, R. (2022). Automated food grain monitoring system for warehouse using IOT. *Measurement Sensors, 24*, 100472. https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100472

Pratama, W. A., Nurchim, N., & Pamekas, B. W. (2024). Prototype of Smart Grain Storage based Internet of Things. *Jurnal Inotera, 9*(2), 257-266. https://doi.org/10.31572/inotera.vol9.iss2.2024.id349

Acevedo, M. F. (2023). *Real-Time Environmental Monitoring*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003425496

Nuno-Maganda, M. A., Hernandez-Mier, Y., Mendoza-Valdez, A. D., Galvan-Villanueva, L. G. y Polanco-Martagon, S. (2024). Sistema de monitoreo remoto de humedad, temperatura y estado de los brotes en un germinador automático. *Revista Elektron, 8*(2), 25-34. https://doi.org/10.37537/rev.elektron.8.2.196.2024

Peña de Loza, F., & Ibarra-Villegas, F. J. (2024). Implementación de tecnologías IoT para la reducción del consumo energético en oficinas inteligentes mediante el control de la iluminación. *Revista de Ciencias Tecnológicas, 7*(3), 106–131. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2594-19252024000300106&script=sci_arttext

Nowroz, S. T., Saleh, N. M., Shakur, S., Banerjee, S., & Amsaad, F. (2025). *A benchmark reference for ESP32-CAM module* (arXiv:2505.24081). https://arxiv.org/abs/2505.24081

Estudio técnico para la valorización de residuos sólidos orgánicos vegetales provenientes de la plaza de mercado San Francisco de Bucaramanga, Santander. Estudio de caso

Alba Josefa Vargas Buitrago,[a*] Carlos Alberto Amaya Corredor,[a] José Luis Bautista González[b]

Abstract

This technical study assesses the potential for valorizing organic vegetable solid waste generated at the San Francisco Market Square in Bucaramanga as a strategy to enhance sustainable waste management and promote a circular economy approach. Through statistical sampling, 28 tons of waste per week were characterized, identifying a predominantly vegetable fraction, with pineapple peels accounting for 25 % of the total. Using text mining techniques and a systematic literature review, feasible valorization alternatives were identified, with the biorefinery approach prioritized. Bromelain extraction is proposed as the main recovery pathway, complemented by the production of organic fertilizers through composting of residual biomass. The results demonstrate that biotechnological valorization of these residues can significantly reduce environmental impacts, decrease the amount of waste sent to landfills, and generate high-value-added products with potential applications in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries, contributing to local sustainable development and resource efficiency.

Keywords: Organic solid waste, biorefinery, pineapple peel, bromelain extraction, waste valorization, circular economy

[a] Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías, Programa de Ingeniería Ambiental, Unidades Tecnológicas de Santander (Colombia).
[b] Institución Educativa de Santander (Colombia).
[*] Autor de correspondencia: avargas@correo.uts.edu.co

Introducción

Las plazas de mercado representan un espacio destinado al intercambio y la comercialización directa de productos agroalimentarios; sin embargo, también constituyen un importante foco de generación de residuos sólidos, cuya gestión deficiente contribuye significativamente al deterioro y contaminación ambiental. De acuerdo con el informe What a Waste 2.0, elaborado por el Banco Mundial, en el año 2016 se generaron aproximadamente 2.010 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) a nivel mundial, cifra que podría incrementarse hasta 3.400 millones de toneladas para el año 2050 (Buitrago et al., 2025). Este escenario plantea desafíos significativos no solo desde el punto de vista ambiental, debido al deterioro progresivo de los ecosistemas, sino también desde una perspectiva económica (Kaza et al., 2018).

En el contexto de las plazas de mercado, los residuos sólidos de origen vegetal provienen principalmente de desechos generados durante la comercialización de frutas, legumbres y hortalizas. Según información de la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), en promedio se generan 40 toneladas de residuos sólidos diariamente en las plazas de mercado del área metropolitana de Bucaramanga, de las cuales un alto porcentaje va al relleno sanitario El Carrasco, que ya culminó su vida útil y está en proceso de cierre.

En Colombia, los residuos derivados del consumo de productos agrícolas y de las transformaciones agroindustriales aún no han sido aprovechados de manera eficiente. En este contexto, investigaciones recientes han desarrollado diversos procesos orientados a la obtención de productos con alto valor comercial a partir de estos residuos, entre los que se incluyen enzimas, fibra, azúcares solubles, aminoácidos, minerales, ácidos orgánicos, flavonoides, aceites esenciales, vitaminas, metabolitos secundarios biológicamente activos y otros agentes bioactivos. En consecuencia, estos residuos pueden considerarse fuentes abundantes y de bajo costo de compuestos químicos, biomateriales y sustratos para procesos biotecnológicos, cuya concentración varía en función de la fracción del

residuo (jugo, cáscara, pulpa o mesocarpio), el estado de madurez del material vegetal y el método de extracción empleado.

Las biorrefinerías se conciben como industrias integradas de base biológica que emplean una amplia gama de tecnologías para transformar biomasa en productos de mayor valor agregado, como productos químicos, combustibles, alimentos e ingredientes alimentarios, biomateriales y fibras, así como energía en forma de calor y electricidad, contribuyendo de manera significativa a la sostenibilidad ambiental y al aprovechamiento integral de los residuos orgánicos (Pineda et al., 2021). De manera general, las tecnologías de valorización aplicables a este tipo de residuos pueden agruparse en tres categorías principales: *i*) valorización biológica y química, *ii*) obtención de combustibles derivados de residuos y *iii*) valorización térmica (Rhyner et al., 2017). En el contexto de las plazas de mercado y la agroindustria local, la valorización biológica y química resulta particularmente relevante debido a la elevada concentración de materia orgánica, humedad y compuestos bioactivos presentes en estos residuos, lo cual facilita su aprovechamiento y conversión en productos con valor agregado mediante procesos ambientalmente sostenibles y de reducido impacto ecológico.

Los residuos vegetales de plazas de mercado presentan un alto potencial para la obtención de subproductos de mayor valor agregado (Vega Cañizares, 2017), como pectinas, enzimas, aceites esenciales, flavonoides, carotenoides y fibra dietaria, los cuales pueden extraerse a partir de fracciones específicas como cáscaras, pulpas y residuos de frutas maduras o sobremaduras (Lim et al., 2007). Por otra parte, pueden aprovecharse para la obtención de biogás mediante procesos de digestión anaerobia (Rhyner et al., 2017). Este combustible renovable puede utilizarse para la generación de energía térmica y eléctrica, así como biocarburante (Abraham et al., 2007). En escenarios técnicamente viables, el biogás puede ser empleado como materia prima para la producción de hidrógeno o metanol, siempre que se controlen variables como la humedad y el poder calorífico de la biomasa (Del Pópolo Grzona, et al., 2022).

La presente investigación está orientada a identificar el tipo de residuo que representa el mayor porcentaje en la composición de los residuos sólidos generados en la plaza de mercado San Francisco, en Bucaramanga, Santander,

mediante la realización de un proceso de caracterización física. Esta etapa inicial permitirá determinar la composición porcentual de los diferentes residuos generados, proporcionando una base técnica para la formulación de estrategias de aprovechamiento y gestión sostenible. Para ello, se aplicará un método de caracterización basado en muestreo estadístico, que permitirá obtener información representativa y confiable sobre la composición, tipología y proporciones de los residuos generados, minimizando sesgos asociados a variaciones temporales y operativas propias de este tipo de establecimientos. A partir de los resultados de la caracterización, se determinará el residuo orgánico de mayor generación, considerando criterios cuantitativos como la masa, la frecuencia de generación y su participación porcentual dentro del total de residuos producidos. Posteriormente y a partir de una revisión de la literatura científica especializada, se analizarán y evaluarán las principales alternativas de valorización aplicables a dicho residuo, priorizando aquellas identificadas para la recuperación de compuestos con alto valor agregado mediante procesos biológicos, químicos o biotecnológicos. La selección del método de valorización más viable se fundamentará en criterios técnicos, ambientales y de aplicabilidad local, como la disponibilidad de materia prima, el nivel de complejidad tecnológica, el impacto ambiental asociado y el potencial de implementación a escala local. De esta manera, la investigación busca aportar conocimiento científico y técnico que contribuya a la gestión sostenible de los residuos orgánicos generados en plazas de mercado, promoviendo su aprovechamiento como recurso y fortaleciendo enfoques de economía circular en contextos urbanos.

Materiales y metodología

Con el propósito de analizar la problemática asociada a los residuos sólidos generados en el establecimiento comercial, donde predominan los residuos orgánicos provenientes de frutas y verduras, la presente investigación centró su atención en esta fracción, descartando los residuos de naturaleza inorgánica por no constituir el objeto de estudio. Como etapa inicial, se llevó a cabo la caracterización de los residuos sólidos en la plaza, considerando su composición y cantidad. Este

procedimiento permitió estimar la proporción de residuos vegetales con potencial de aprovechamiento, los cuales constituyen la materia prima fundamental para el desarrollo de la presente investigación. A partir de los resultados de la caracterización, se identificaron los residuos de mayor generación, con el objetivo de focalizar el estudio en aquellos con mayor representatividad y potencial de valorización. De manera complementaria, se emplearon técnicas de minería de texto para evaluar el nivel de desarrollo científico y tecnológico asociado al aprovechamiento de estos residuos, así como para identificar los biocompuestos de valor agregado potencialmente obtenibles. Con base en el análisis integrado de la caracterización de residuos y la revisión bibliográfica sistemática, se procedió al diseño conceptual de una biorrefinería orientada al aprovechamiento del residuo seleccionado.

Resultados

Entre los residuos de origen vegetal identificados durante la caracterización se encontraron piña, cítricos, maracuyá, también hortalizas y leguminosas, como frijol, arveja, repollo y lechuga. En conjunto, esta fracción constituye el mayor porcentaje de los residuos sólidos en la plaza, confirmando el predominio de los residuos orgánicos de origen vegetal previamente señalado. Con el propósito de identificar el componente con mayor representación dentro de esta fracción, se realizó un análisis de la composición porcentual, el cual permitió establecer que los residuos de piña corresponden al componente de mayor generación, constituyéndose en la materia prima seleccionada para el desarrollo de la presente investigación.

Teniendo en cuenta los resultados consolidados en la tabla 1, semanalmente se disponen en el relleno sanitario aproximadamente 28.3 toneladas de residuos sólidos de origen vegetal. En esta fracción, las cáscaras de piña constituyen el residuo de mayor generación, con cerca de 7 toneladas semanales (25 %). Una vez identificada la piña como el residuo con mayor porcentaje de generación y la materia prima con mayor potencial de aprovechamiento, se emplearon técnicas de minería de texto para identificar las principales alternativas de valorización

Tabla 1. Composición cualitativa y cuantitativa del componente de mayor generación en la plaza de mercado San Francisco

Composición	Peso (kilogramos)								Total composición (kilogramos)	%
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Lunes		
Cáscara de piña	525.2	643.2	1401.5	1317.8	962.0	934.6	1024.5	562.3	7371.1	25.99
Cáscara de frijol y arveja	162.5	209.1	789.7	571.5	732.4	644.3	676.5	171.2	3957.2	13.95
Cáscara de naranja	179.7	222.9	529.7	555.2	473.4	211.5	244.5	184.6	2601.5	9.17
Fruta en mal estado	379.9	419.7	454.9	453.5	622.3	326.3	345.4	361.3	3363.2	11.86
Hoja de repollo y lechuga	262.9	289.1	826.8	861.9	932.5	532.5	554.9	289.8	4550.3	16.05
Otros vegetales	450.8	569.2	785	854.3	1085.4	1108.7	1120.9	539.5	6513.7	22.98
Total (kilogramos)	1960.0	2353.0	4787.5	4614.2	4808.0	3758.0	3966.7	2108.6	28356.8	100

de dichos residuos. Los residuos de frutas se caracterizan por su alto contenido de humedad, lo que se traduce en un bajo poder calorífico y limita significativamente su potencial para la generación de energía mediante procesos térmicos (Economou, et al., 2024). Adicionalmente, diversos estudios han señalado que la valorización energética de este tipo de residuos puede conllevar la emisión de gases contaminantes, tales como HCl, HF, CO, CO_2 y NOx, así como hidrocarburos aromáticos halogenados, entre los que se destacan las dioxinas y los furanos, compuestos de alta toxicidad ambiental y sanitaria (Conesa, 2019).

Figura 1. Biorrefinería propuesta para la plaza de mercado San Francisco de Bucaramanga



Dada la diversidad de productos de valor agregado que pueden obtenerse a partir de los residuos de piña, y considerando las condiciones específicas del estudio de caso, particularmente la disponibilidad de materia prima (aproximadamente siete toneladas semanales), el nivel tecnológico requerido y la oferta potencial de mercado, se propone la implementación de un esquema de biorrefinería para la valorización de los residuos orgánicos generados en el establecimiento de comercialización de mercado tal como se muestra en la Figura 1. En esta propuesta, la extracción de bromelina se plantea como la ruta principal de valorización, debido a su alta demanda y a sus múltiples aplicaciones en los sectores de la industria cosmética, farmacéutica, la salud y alimentaria. De manera complementaria, los residuos remanentes, incluidos los subproductos de la

piña, se destinan a procesos de compostaje, orientados a la obtención de fertilizantes orgánicos sólidos y líquidos de alto valor nutricional. Esta estrategia de valorización aporta beneficios ambientales significativos, como el aumento en la disponibilidad de nutrientes esenciales del suelo (nitrógeno, fósforo y azufre), la inactivación de residuos de plaguicidas por adsorción, la mejora de la permeabilidad del suelo y la reducción de procesos erosivos, contribuyendo así a una gestión sostenible de los residuos orgánicos (Tejada et al., 2018).

Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que la gestión actual de los residuos sólidos de origen vegetal generados en las plazas de mercado del área metropolitana de Bucaramanga, particularmente en la plaza de mercado San Francisco, es insuficiente frente a los volúmenes producidos y al potencial de aprovechamiento que estos residuos presentan. La etapa final en el relleno sanitario El Carrasco continúa siendo la práctica predominante, pese a los elevados costos económicos, ambientales y sociales asociados, y a la limitada implementación de estrategias de valorización. Los residuos mayoritarios, provenientes de frutas y hortalizas como piña, naranja, maracuyá, frijol y arveja, presentan un elevado potencial para obtener compuestos con valor agregado tal como se propone para la piña; no obstante, su aprovechamiento mediante tecnologías térmicas resulta poco viable debido a su bajo poder calorífico y alto contenido de humedad. En este contexto, el planteamiento de una biorrefinería emerge como una estrategia técnica y ambientalmente adecuada, destacándose la piña como residuo prioritario para la extracción de bromelina y la obtención complementaria de fertilizantes orgánicos sólidos y líquidos. Adicionalmente, la articulación de los residuos generados en la totalidad de las plazas de mercado del área metropolitana permitiría escalar el modelo propuesto, incrementando de manera significativa la capacidad productiva del sistema y reduciendo sustancialmente la cantidad de residuos destinados a disposición final. Estos resultados refuerzan la obligación de ir hacia esquemas de economía circular que incorporen la

valorización de residuos orgánicos como eje central de la gestión sostenible de residuos urbanos.

Referencias

Abraham, E. R., Ramachandran, S. y Ramalingam, V. (2007). Biogas: can it be an important source of energy? *Environmental Science and Pollution Research-International, 14*(1), 67-71. https://doi.org/10.1065/espr2006.12.370

Buitrago, A. J. V., Corredor, C. A. A. y González, J. L. B. (2025). Environmental Education as a Fundamental Pillar of Sustainable Solid Waste Management: An Integrative Approach to Social and Environmental Change. *TPM-Testing, Psychometrics, Methodology in Applied Psychology, 32*(S8), 262-271.

Conesa, J. A. (2019). Dioxins from Agro Waste Combustion: Evaluation and Management. En Benjamin K. Simpson, Alberta N. A. Aryee y Fidel Toldrá (Eds.), *Byproducts from Agriculture and Fisheries: Adding Value for Food, Feed, Pharma, and Fuels* (pp. 629-640). Wiley Online Library. https://doi.org/10.1002/9781119383956.ch28

Del Pópolo Grzona, M., López, E. y Pedernera, M. N. (2022). *Estudio de procesos para la obtención de hidrógeno a partir de biogás*. XXII Congreso Argentino de Catálisis, La Plata, Argentina.

Economou, F., Voukkali, I., Papamichael, I., Phinikettou, V., Loizia, P., Naddeo, V., Sospiro, P., Liscio, M. C., Zoumides, C., Țîrcă, D. M. y Zorpas, A. A. (2024). Turning food loss and food waste into watts: A review of food waste as an energy source. *Energies, 17*(13), 3191. https://doi.org/10.3390/en17133191

Kaza, S., Yao, L., Bhada, P. y Van, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Grupo Banco Mundial.

Lim, Y. Y., Lim, T. T. y Tee, J. J. (2007). Antioxidant properties of several tropical fruits: A comparative study. *Food Chemistry, 103*(3), 1003-1008. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.038

Pineda, J. S. T., Reyes, C. Y. y Ramírez, J. E. S. (2021). Subproductos generados en el tratamiento y valorización de residuos sólidos urbanos dentro del concepto de biorrefinería: una revisión sistemática. *Ingeniería y Región, 25*, 60-74.

Rhyner, C. K., Schwartz, L. J., Wenger, R. B. y Kohrell, M. G. (2017). *Waste Management and Resource Recovery*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203734278

Tejada, M., González, J. L., García-Martínez, A. M. y. Parrado, J. (2018). Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties. *Bioresource Technology, 99*(11), 4949-4957. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.026

Vega Cañizares, K. A. (2017). *Extracción de bromelina obtenida a partir de residuos del procesamiento de piña (*Ananas comosus*)* [Tesis de licenciatura]. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18867

Development of a DAQ for a desorption process

Veronica Viviana Sandoval Perez,[a] Angel Gabriel Fernando Correa Barrera,[a*] Miriam Navarrete Procopio,[a] Víctor Manuel Zezatti Flores,[b] K. A. Altamirano Tlali[b]

Abstract

The increase in carbon dioxide (CO_2) emissions associated with electricity generation from fossil fuels has driven the development of post-combustion carbon capture technologies. This paper presents the development of a data acquisition (DAQ) system for temperature monitoring in a laboratory-scale CO_2 desorption process using an aqueous monoethanolamine (MEA) solution. The desorption system uses a countercurrent packed column, in which CO_2 is separated from the solution by the addition of steam. Five strategic points in the process were instrumented with temperature sensors, whose data are acquired by an Arduino microcontroller and displayed in real time through a graphical interface developed in Python. The results show thermal behavior consistent with the expected operating conditions, including stabilization at temperatures close to saturated steam temperature and adequate control of the cooling system. The developed system serves as an accessible tool for analyzing and optimizing desorption processes in experimental applications.

Keywords: DAQ, GUI, Arduino, Python, desorption process.

[a] Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM.
[b] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[*] Corresponding author: angel.correa@fcqei.uaem.edu.mx

Introduction

The increase in carbon dioxide (CO_2) emissions from electricity generated by fossil fuels is a primary cause of climate change (Rothenberg, 2023; Afrane et al., 2025; Adu et al., 2024). As a result, post-combustion CO_2 capture is considered a viable option for thermoelectric power plants (Subramanian & Madejski, 2023; Obi et al., 2024). Solvents such as monoethanolamine (MEA) have been extensively studied for CO_2 absorption (Wang et al., 2023; Majnoon et al., 2024). To reuse the solvent, it must undergo desorption, where CO_2 is released by adding heat (Zeng et al., 2025). The performance of this step depends on temperature and other thermodynamic conditions. Measuring temperature at key heat transfer points helps evaluate system performance (Sang et al., 2025).

Temperature measurements, including those at the steam inlet and outlet, the solution inlet and outlet, and the temperature maintained in the heat exchanger, must be obtained. This allows us to more accurately describe the thermal behavior of the desorption system and estimate the regeneration efficiency of the MEA solution. For this *type* of project, low-cost systems such as Arduino, which have gained relevance, are utilized, along with Python programming tools that enable the construction of a data acquisition system (Reivanth et al., 2024; Saad Abdulhakeem et al., 2024; Grinias et al., 2016). These current solutions offer the possibility of integrating multiple temperature sensors in a synchronized manner, as they enable real-time information processing and have interfaces that adapt to various experimental processes, making them viable alternatives for this *type* of process (Kumar et al., 2022; León et al., 2024; Khattak et al., 2021).

Based on these conditions, a need arose for a temperature data acquisition system, which was implemented using an Arduino-based data acquisition (DAQ) system with five temperature sensors, each with its own conditioning component. The recorded information is presented in real time via a graphical user interface (GUI) developed in Python, enabling continuous monitoring of the desorption process's thermal variables at the laboratory scale. The resulting system is proposed as a support tool for studying desorption at the laboratory

scale, enabling the acquisition of reliable thermal data for subsequent evaluations and work aimed at improving the process's performance.

Materials and methodology

Figure 1 illustrates the desorption system used for this project, which is installed in the Laboratorio de operaciones unitarias of the Facultad de ciencias Quimicas e ingenieria at Universidad Autónoma del Estado de Morelos. This unit was designed to reproduce at laboratory scale the stage in which the MEA solution mixture, previously loaded with CO_2, is heated to release the retained CO_2 and allow its reuse in subsequent processes. Table 1 presents the configuration that enables the system to operate and record the primary variables involved during this process.

The process takes place in a packed column (P.T.-101), where the vapor rises counter currently to the downward flow of the load CO_2 solution. The internal packing of the column in this case promotes contact between the two phases, facilitating the release of CO_2 from the liquid. Figure 1 illustrates the physical setup of the system, which includes the storage tanks (TK-101, TK-102, and TK-103), desorption column (P.T.-101), a steam generator (CV-101), and a condenser (CN-101), as well as the location of the temperature sensors required for this process, as listed in Table 2.

The methodology focused on implementing a Graphical User Interface (GUI) designed for a CO_2 desorption system to monitor process temperatures at different points. Table 3 illustrates the electronic components and *software* used.

Table 1. Operating conditions

Variable	Value
Cooling fluid temperature	20 °C
Steam generator pressure	5 bar
Desorbing	Saturated steam

Table 2. Temperature sensors

Code	Measurement point
TP-01	Cooling fluid
TP-02	Solution outlet
TP-03	Steam outlet
TP-04	Solution inlet
TP-05	Steam inlet

Figure 1. Laboratory-scale desorption system

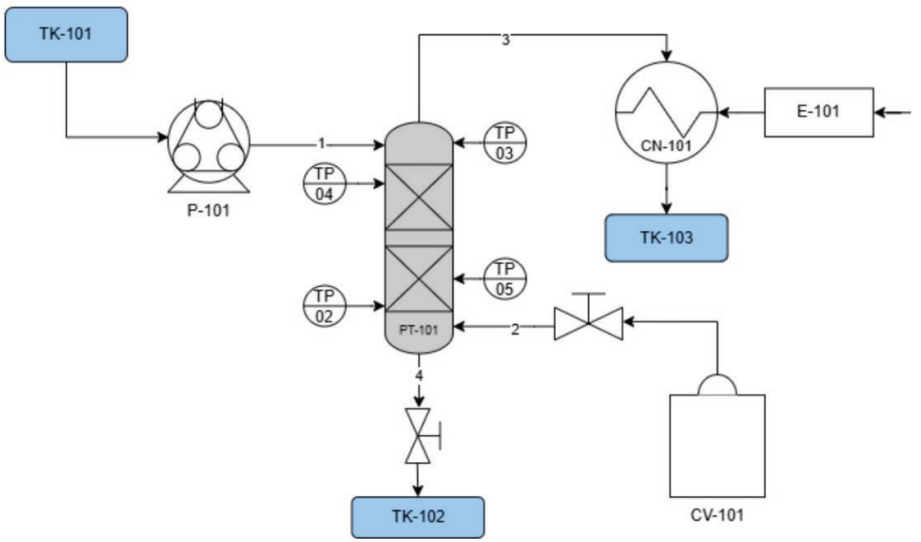


Table 3. Electronic components and software used

Components	Software
Arduino Uno board	Arduino IDE
DS18B20 temperature sensors	Python 3.x
USB cable for Arduino	Python libraries
Breadboard and jumper wires	Arduino libraries
4.7 kΩ resistors	Microsoft Excel
Computer	

1) Component identification and testing. The circuit connection diagram (illustrated in Figure 2) was assembled on a breadboard for functional testing and data acquisition to detect potential errors.

2) Programming and data acquisition of the Arduino microcontroller. The Arduino Uno board was configured for the acquisition of analog signals and their transmission via the USB connection to the computer.

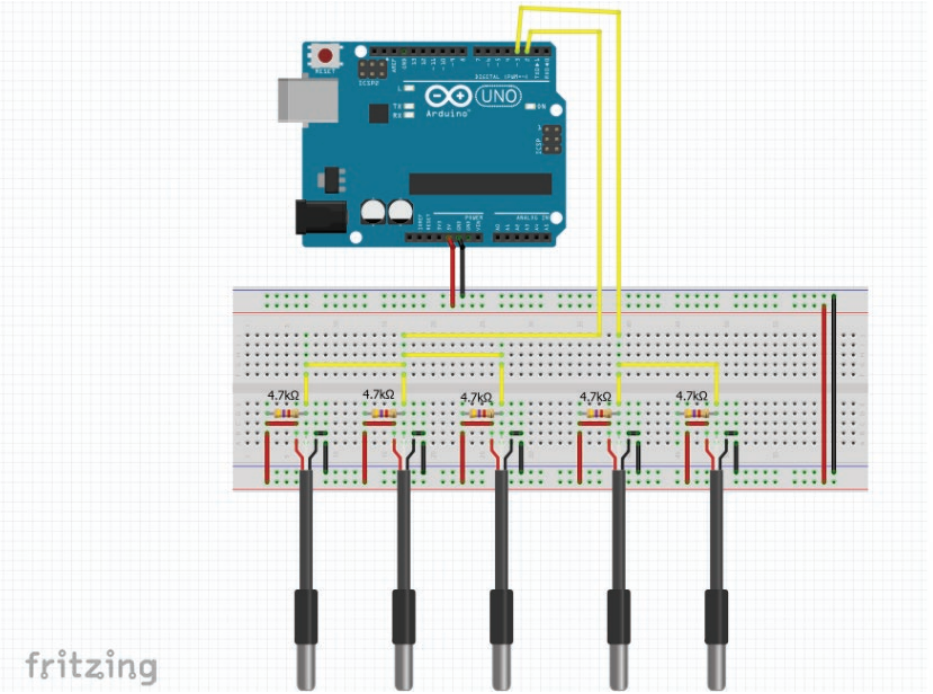
3) Circuit assembly on phenolic board. To achieve a fixed circuit with greater mechanical resistance, the circuit components were soldered, ensuring the correct connection order to prevent false contacts and minimize noise and interference.

4) Sensor calibration, linear adjustment equations were obtained for each temperature sensor.

5) Instrumentation and integration into the desorption system. To integrate the subsystem into the packed desorption column, temperature sensors were placed in five strategic locations. The microcontroller was connected, and tests were performed to ensure the correct operation, control, and monitoring of the desorption system.

6) Development, validation, and implementation of the GUI in Python. In this stage, the experimental tests shown in the results were developed.

Figure 2. Connection diagram of the DS18B20 temperature sensors



Results

Figure 3 illustrates the Graphical User Interface design. The interface features four push buttons. These enable users to initiate, terminate, and resume real-time temperature data acquisition for the system. Data can also be saved to a chosen destination folder on the computer. Here, time and temperature data are saved in CSV format. The interface displays the thermocouple number and its corresponding temperature value in degrees Celsius (°C). Users can graphically visualize the temperature in Celsius for the five sensors. Each sensor is distinguished by a different color. It is possible to identify each sensor with the name of the measurement point. The results of the desorption tests are illustrated in Figure 4.

Figure 3. Graphical User Interface for a desorption system

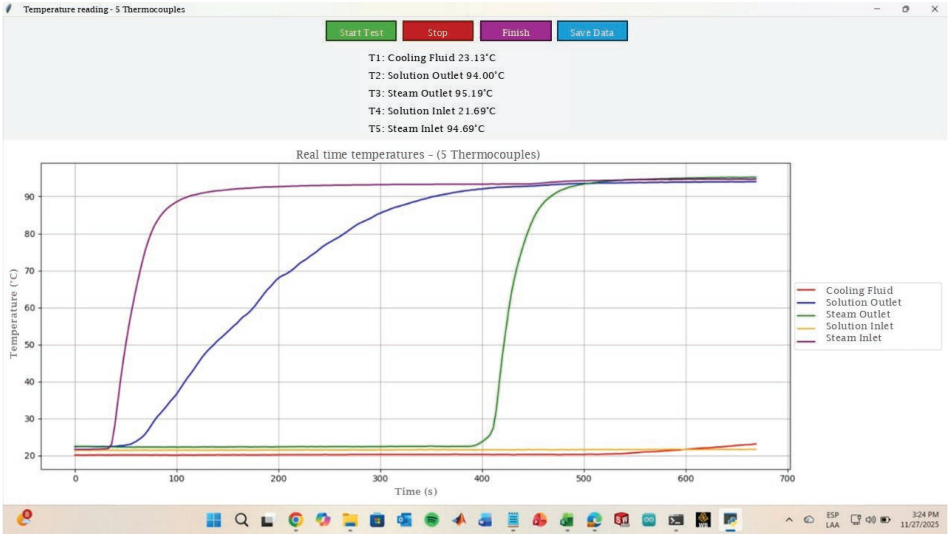
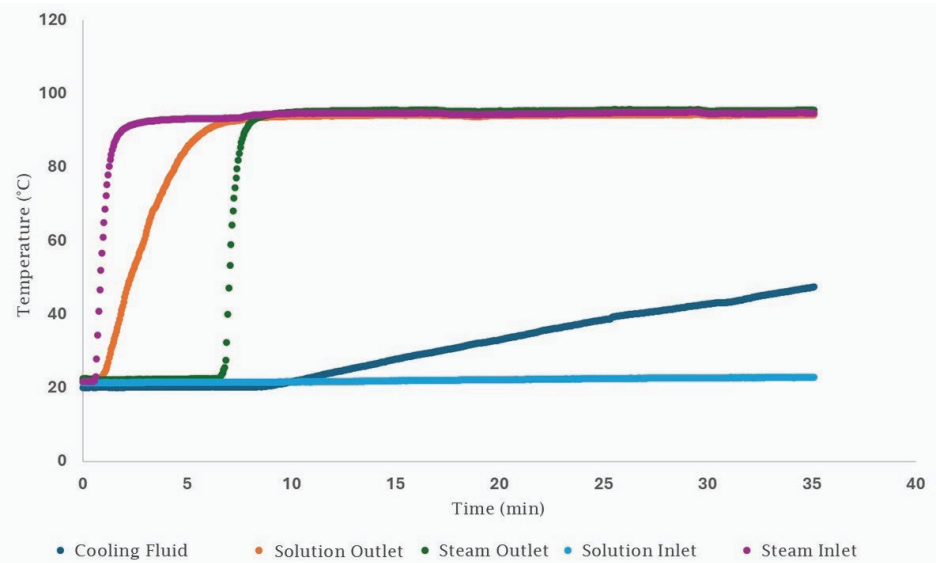


Figure 4. Desorption process temperature



The system stabilized at 96 °C at the steam inlet and 95 °C at the solution outlet, indicating process control. The cryothermostat kept the cooling fluid at 20 °C, preventing overheating. The solution inlet sensor stabilized at 21 °C. The sensor at the top of the column, 0.6 m from the steam inlet, maintained a range of 95-100 °C (saturated steam temperature).

Conclusions

An intuitive and user-friendly graphical interface was developed for the desorption process. The DAQ implementation enabled simultaneous, real-time recording of the temperature variable, facilitating direct observation of the process's thermal behavior. Access to this information provides a database for system analysis and evaluation. The tool is useful for evaluating and optimizing the desorption process for future applications, particularly in laboratory-scale settings and industrial processes.

References

Adu, D., Jianguo, D., Asomani, S. N., & Abbey, A. (2024). Energy generation and carbon dioxide emission: The role of renewable energy for green development. *Energy Reports, 12*, 1420-1430. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.013

Afrane, S., Ampah, J. D., Adun, H., Chen, J. L., Zou, H., Mao, G., & Yang, P. (2025). Targeted carbon dioxide removal measures are essential for the cost and energy transformation of the electricity sector by 2050. *Communications Earth & Environment, 6*(1), 227. https://doi.org/10.1038/s43247-025-02190-8

Grinias, J. P., Whitfield, J. T., Guetschow, E. D., & Kennedy, R. T. (2016). An Inexpensive, Open-Source USB Arduino Data Acquisition Device for Chemical Instrumentation. *Journal of Chemical Education, 93*(7), 1316-1319. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00262

Khattak, A., Ahmad, M. M., & Khan, F. U. (2021). Arduino Based Control And Data Acquisition System Using Python Graphical User Interface (GUI). *International Journal of Scientific & Technology Research, 10*(06), 124.

Kumar, S., Kolekar, T., Patil, S., Bongale, A., Kotecha, K., Zaguia, A., & Prakash, C. (2022). A Low-Cost Multi-Sensor Data Acquisition System for Fault Detection in Fused Deposition Modelling. *Sensors, 22*(2), 517. https://doi.org/10.3390/s22020517

León, M. F. S., Castañeda, E. O., Flores, Z., & Becerro, Á. T. (2024). Instrumentación y control de un proceso de absorción a escala laboratorio. In Á. Tlatelpa Becerro (Ed.), *Avances en ingeniería: investigaciones y aplicaciones* (pp. 19-38). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Majnoon, A., Hajinezhad, A., & Moosavian, S. F. (2024). Simulation model of carbon capture with MEA and the effect of temperature and duty on efficiency. *Future Energy, 3*(2), 37-47. https://doi.org/10.55670/fpll.fuen.3.2.5

Obi, D., Onyekuru, S., & Orga, A. (2024). Review of recent process developments in the field of carbon dioxide (CO_2) capture from power plants flue gases and the future perspectives. *International Journal of Sustainable Energy, 43*(1). https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2317137

Reivanth, K., Priya, A., & Nataraj, D. (2024). A Low-Cost Arduino and Python Based Gas Sensing Setup: Bridging Theory and Practice in Educational Environments. *Journal Of Chemical Education, 101*(12), 5361-5368. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00981

Rothenberg, G. (2023). A realistic look at CO_2 emissions, climate change and the role of sustainable chemistry. *Sustainable Chemistry For Climate Action, 2*, 100012. https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100012

Saad Abdulhakeem, B., Maad Hamdi, M., & Abdulsamad Sadeq, M. (2024, June). *Data Acquisition Board by Using Arduino to Measure Weather Temperature and Humidity*. 5th International Conference On Communication Engineering And Computer Science, Cihan University-Erbil Conferences. https://doi.org/10.24086/cocos2024/paper.1559

Sang, L., Zhou, T., Yang, W. Y., Zheng, X. F., Xu, X. Y., & Zhao, Z. P. (2025). CO_2 desorption and mass transfer characteristic study in micropacked bed

reactors. *Separation and Purification Technology, 353*, 128420. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128420

Subramanian, N., & Madejski, P. (2023). Analysis of CO_2 capture process from flue-gases in combined cycle gas turbine power plant using post-combustion capture technology. *Energy, 282*, 128311. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128311

Wang, N., Wang, D., Krook-Riekkola, A., & Ji, X. (2023). MEA-based CO_2 capture: a study focuses on MEA concentrations and process parameters. *Frontiers in Energy Research, 11*, 1230743. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1230743

Zeng, X., Zhang, Y., Zhong, S., Li, H., Lu, F., Liang, B., & Tang, S. (2025). Kinetics Study on CO_2 Desorption of Monoethanolamine Solution. *SSRN Electronic Journal*. https://doi.org/10.2139/ssrn.5163586

Aplicación de la metodología de sistemas blando en acción en un sistema productivo y organizacional de una PYMEX

Jorge Tello Cruz,[a*] Rebeca Reyes de la Rosa,[a] Zeus Iván Rangel Diaz[a]

Abstract

This work covers the problems of small businesses, both in the economic and social spheres, proposing a production and organization study which was carried out in the company Acanalados San Isidro, applying the Soft Systems Methodology; using as a core tool industrial engineering via methods engineering, industrial organization and operations management.

Keywords: systemic, root definition, systemic approach, Peter Checkland methodology, holistic.

Introducción

El presente trabajo aplica la metodología de sistemas blando en acción como una repuesta a una problemática principal de la empresa Acanalados San Isidro por la no utilización de la Administración Científica, tan necesaria en tiempos de grandes retos de las PYMEX. Las herramientas que se proponen son parte de la ingeniería industrial; ingeniería de métodos y administración de operaciones (pronósticos e inventarios); finalmente, también se plantea un organigrama que haga posible una mejor organización dentro de la Empresa.

La metodología de "sistemas blandos en acción" (SBA) nos permite observar la problemática principal de la Empresa, así como sus posibles soluciones con

[a] Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco.
[*] Autor de correspondencia: jorge_tc@tesch.edu.mx

base la aplicación de la propia metodología, dando como resultado la solución inicial y posteriores mejoras para el logro de la mejora continua.

El presente trabajo retoma de forma íntegra un fragmento de la tesis de maestría de Tello Cruz (2006) acerca del diseño de sistemas de organización y producción de una empresa cartonera.

Materiales y metodología

Para elaborar la propuesta de aplicación, se utilizará la Metodología SBA, desarrollada por Peter Checkland. Esta metodología consta de siete estadios:

1) Situación del problema no estructurada.
2) Expresión de la situación problema.
3) Definiciones raíz de sistemas relevantes.
4) Construcción de modelos conceptuales.
5) Comparación de los modelos conceptuales con la expresión de la situación problema.
6) Definición de cambios deseables y factibles.
7) Acciones para mejorar la situación problema.

Aplicación de la Metodología SBA al caso de la empresa Acanalados San Isidro

Estadio 1. Situación del problema no estructurada

La problemática identificada en Acanalados San Isidro se origina por el desconocimiento y falta de aplicación de técnicas de ingeniería de étodos. Esta situación se evidencia en tres factores: primero, la ausencia de documentación técnica detallada de materiales, procedimientos, herramientas y equipos utilizados en producción; segundo, la insuficiente preparación técnica del personal directivo; tercero, la desconfianza hacia la administración científica como alternativa de mejora organizacional, como se observa en la Figura 1 (Tello, 2006, p. 30).

Estadio 2. Expresión de la situación problema

La situación problema de Acanalados San Isidro se expresa mediante tres elementos interrelacionados que impiden la aplicación de la Administración Científica:

> Dimensión técnica-operativa: no existen registros formales de los procesos de producción. La empresa carece de hojas de proceso ; diagramas de flujo ; estudios de tiempos y movimientos, y especificaciones técnicas de materiales, herramientas y equipos. La operación se realiza de forma empírica, basada en la experiencia del personal operativo.
>
> Dimensión directiva: El personal que dirige la empresa no cuenta con formación en técnicas de Ingeniería de Métodos, Pronósticos o Control de Inventarios. Las decisiones de producción se toman sin datos históricos ni planeación, lo que genera paros por desabasto de materia prima e incumplimiento de volúmenes planeados.
>
> Dimensión cultural-organizacional: Existe desconfianza hacia los métodos de administración científica. Se perciben como complejos, costosos y ajenos a la realidad de una PYMEX. Esta percepción limita la aceptación de cambios propuestos, como se evidencia en la Figura 1 (Tello, 2006, p. 30).

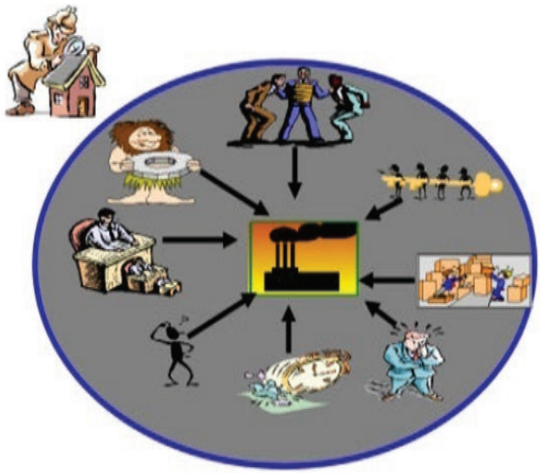
La interacción de estas tres dimensiones configura un sistema de producción sin control, donde la falta de datos impide planear; mientra que la falta de conocimiento, mejorar, y la falta de credibilidad, cambiar.

Estadio 3. Definiciones raíz de sistemas relevantes

Se define como sistema relevante a un Sistema de Planeación y Control de la Producción basado en Pronósticos e Inventarios con la siguiente definición raíz:

Un sistema propiedad del área de producción de Acanalados San Isidro, operado por el personal directivo y de almacén, para estimar la demanda futura y

Figura 1. Situación de la empresa en general



gestionar los inventarios de materia prima, mediante técnicas de pronósticos y control de inventarios, con el fin de evitar paros de producción por desabasto, cumplir con los volúmenes planeados y reducir los tiempos de entrega al cliente, en el contexto de una PYMEX con recursos limitados y sin documentación técnica de sus procesos.

Justificación del sistema relevante:

La aplicación de este sistema permitirá:

1) Evitar la suspensión de la producción por falta de materia prima mediante un control de inventarios adecuado.
2) Reducir pérdidas económicas por paros y horas-hombre no utilizadas.
3) Generar requerimientos de materia prima a partir de pronósticos basados en datos históricos de ventas.

4) Mejorar el nivel de servicio al cliente al disminuir tiempos de espera y evitar desabasto de producto terminado.

Estadio 4. Modelos Conceptuales

CATWOE , fuente Alemanas.

C: sistema de producción.

A: personal con necesidad de capacitar.

T: ¿sistema de producción empirico? Sistema de producción estructurado.

W : weltanschauung, Cosmovisiones (escenarios) Figuras 2 y 3 (Tello, 2006, pp. 32 -33).

O: sistema de producción.

E: planeación y control de la producción en forma científica.

Figura 2. Visión del trabajador

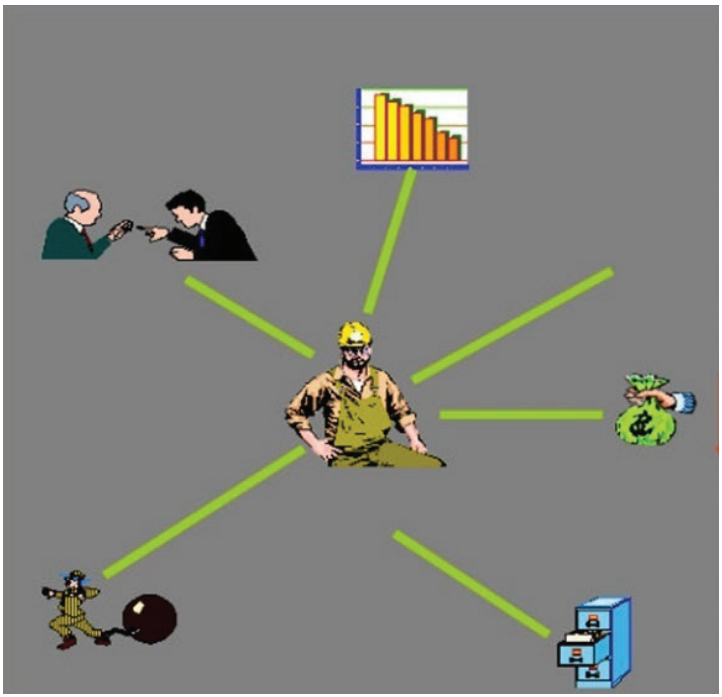


Figura 3. Visión del patrón



El análisis cultural

Análisis social del sistema

En el ámbito interno, el impacto social del sistema de producción es limitado y se centra en facilitar a los trabajadores la comprensión de los métodos de producción mediante la estandarización.

En el ámbito externo, el impacto es significativo durante contingencias. La empresa participa activamente en la venta de lámina de cartón a precios preferenciales al gobierno, organizaciones no gubernamentales y asociaciones civiles para apoyo a damnificados por huracanes y otros fenómenos naturales.

Análisis político del sistema

El sistema de producción tiene una participación política mínima, como se observa en la Figura 4 (Tello, 2006, p. 35). La empresa no se involucra en actividades político-partidistas. Su único vínculo es económico-social: genera empleo directo para diez familias e indirecto para quince, y realiza ventas directas a precios de mayoreo a partidos políticos y organizaciones sociales como Antorcha Campesina, sin establecer alianzas políticas.

Figura 4. Modelo conceptual de la empresa



Estadio 5. Comparación de los modelos conceptuales con la realidad

El modelo conceptual propuesto en la Figura 4 (Tello, 2006, p. 35) representa el funcionamiento ideal del sistema de planeación y control de la producción. Al compararlo con la situación real de Acanalados San Isidro , se identifican las siguientes brechas:

1) Ausencia de documentación: la empresa opera de forma empírica, sin formatos ni estudios previos de control de la producción.
2) Inexistencia de infraestructura de datos: no se cuenta con registros históricos de demanda, inventarios o tiempos, lo que impide aplicar técnicas de pronósticos y control.
3) Simplicidad operativa: La baja complejidad de los procesos actuales facilita la visualización de la problemática, incluso sin especialización técnica.

Debido a esta simplicidad y a la operación empírica, el modelo conceptual se apega de forma directa a la realidad, ya que describe funciones básicas que la empresa no ejecuta actualmente. La principal implicación es la necesidad de generar desde cero la infraestructura de datos para sustentar el análisis y la mejora del sistema.

Estadio 6. Identificación de cambios factibles y deseables

1. Deseabilidad: ¿Constituye una mejora técnica?

Sí. La implementación del Sistema de Planeación y Control de la Producción mediante pronósticos e inventarios constituye una mejora técnica, ya que introduce métodos de ingeniería industrial para eliminar paros por desabasto y optimizar el uso de horas-hombre.

2. Factibilidad: ¿Se ajusta a la cultura organizacional?

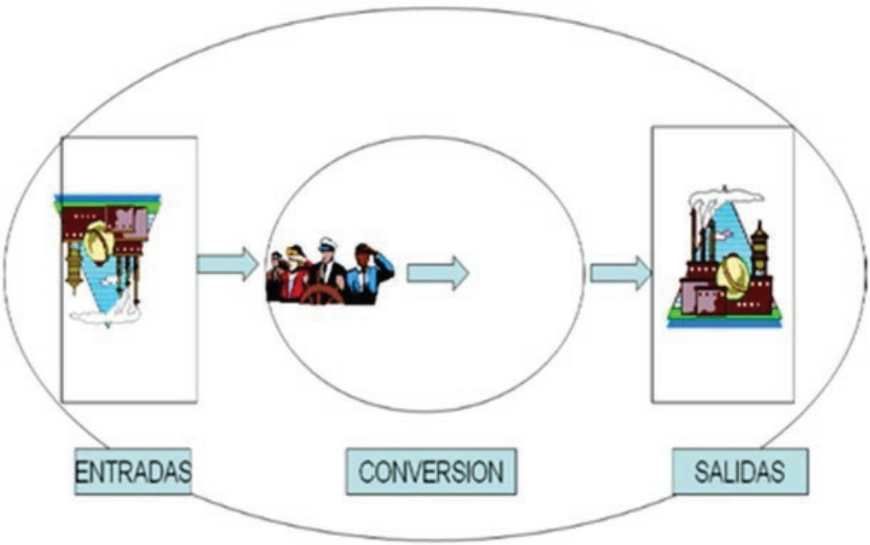
Sí. El sistema es culturalmente factible para la empresa. Aunque los conceptos de pronósticos e inventarios no se aplican de forma científica actualmente, el personal está familiarizado con ellos de manera empírica. Por tanto, no existen barreras culturales que impidan realizar los cambios propuestos.

Estadio 7. Acción para mejorar la situación problema

Los cambios identificados como deseables y factibles en el estadio 6 se implementan mediante las siguientes acciones, como se muestra en la Figura 5 (Tello, 2006, p. 35):

1) Generación de formatos para registro de datos de producción e inventarios.
2) Capacitación del personal en técnicas básicas de pronósticos y control de inventarios.
3) Establecimiento del procedimiento de planeación de requerimientos de materia prima.

Figura 5. Modelo de producción propuesto



Resultados

Como resultado de la aplicación de la metodología de SBA, auxiliándonos de herramientas de ingeniería industrial —como la ingeniería de Métodos, Planeación y Control de la Producción (Pronósticos e Inventarios) y la propuesta de un organigrama para fortalecer la organización de la empresa—, nos percatamos de que esta propuesta de aplicación no es sencilla. Se requiere de sensibilización como primera fase; después, de realizar mediciones, así como de contar con datos históricos. Finalmente, se debe modelar y resolver en primera instancia un estudio científico que soporte estudios posteriores para lograr la mejora continua.

Conclusiones

La aplicación de la metodología de SBA permitió contar con unas propuestas de estudios de métodos confiables para posteriores mejoras. Estas fueron, en verdad, notorias y muy representativas, observando con ello que la empresa ha amalgama do, o mejor dicho, integra do los diferentes subsistemas de la organización, además que relaciona do cada uno de ellos para el logro de la meta de toda empresa que es la de generar riqueza, trabajo y labor social dentro de la comunidad. Se, cumple cabalmente con el proceso sinérgico o de tipo Gestalt, y se trata de un sistema cibernético ciento por ciento, aplicando la propiedad de sistemas llamada *autopoiesis*.

Se debe de recordar que toda organización cambia con el tiempo, por lo que es necesario realizar las siguientes recomendaciones para que las transformaciones que se pretenden realizar no se vean afectadas por los estados variables del ambiente social, político y económico, por lo que se recomienda:

- Buscar financiamientos para el crecimiento y mantenimiento de la Empresa.
- Contratar personal calificado para implementación de estudios de reingeniería.

- Realizar cursos de desarrollo empresarial por parte de los dueños de la Empresas.
- Solicitar a las instituciones de Educación Superior su asesoría de proyectos para su beneficio.
- Tener iniciativa y actitud positiva para cualquier cambio o sugerencia profesional enfocada al mejoramiento continuo de la empresa.
- Realizar constantemente estudios de reingeniería mediante una retroalimentación continua.
- Reinvertir parte de las utilidades para investigación, contribuyendo con esto a salir del atraso tecnológico.
- Crear nuevos productos con base en las necesidades del mercado (se sugiere la introducción de un impermeabilizante y material para la industria del calzado para su empaque o plantillas).
- Realizar una estandarización de procesos y productos.
- Crear una asociación de industriales del mismo giro para apoyos diversos.
- Realizar una mejora continua, donde se involucran mis dos coautores el M. E. N. Zeus Iván Rangel Diaz y la ingeniera Rebeca Reyes de la Rosa.

Referencias

Tello Cruz, J. (2006). *Diseño del sistema de organización y producción de una empresa cartonera* [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico Nacional, México.

Robot didáctico impreso en 3D basado en comunicación *bluetooth*

Jesus Elias Marin Garcia,[a] Gonzalo Solano Ruiz,[a] Noemi Hernández Oliva,[b*] Marisol Alejandre Flores[b]

Abstract

The paper proposes the design of a 3D printed three-degree-of-freedom robotic arm which can serve as a teaching and learning tool for mechatronics. The prototype is built with low-cost mechanical, electronic, and control devices, and the main unit is based on the ESP32 platform that supports *bluetooth* and different operating modes. It contains basic manual control through *joysticks*, automatic control with a well-defined positioning and pre-programmed sequences, and remote integration via *bluetooth* through a mobile application, voice control is also a feature. The robotic arm performance was investigated on how it performed overall and on its educational value. The results indicate stable operation and smooth flow and demonstrate small structural limitations at the base for operation under high loads. Second, through interaction with students in engineering, it was also found that the prototype has a positive impression, and they have obtained better understanding of basic concepts in control, programming and kinematics. The results corroborate the system as usable and effective, enabling the development of educational tools for teaching robotics, with the advantages offered by 3D printing and cost-effective control platforms.

Keywords: teaching, robot, robotic arm, low cost, *bluetooth*.

[a] Ingeniería en Control y Automatización, Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Zacatenco.

[b] Máquinas con Sistemas Automatizados, Instituto Politécnico Nacional, CECyT 2 "Miguel Bernard".

[*] Autor de correspondencia: nhernandezo@ipn.mx

Introducción

La robótica educativa ha sido uno de los métodos clave en la enseñanza de disciplinas de ingeniería en los últimos años, particularmente mecatrónica, robótica e ingeniería de automatización. Como apoyo en la enseñanza de la robótica, desde el punto de vista académico, se requiere de la experimentación, por lo que estudios recientes han empleado plataformas robóticas a bajo costo. En este sentido, los estudiantes aprenden acerca de la cinemática, control, programación y sistemas embebidos (Evripidou et al., 2020; Shibata et al., 2021). En este contexto, el uso de brazos robóticos ha surgido como una opción viable debido a su similitud con modelos industriales, dándoles ventajas educativas a quienes refuerzan aspectos teóricos con la práctica. Por lo tanto, el diseño de brazos robóticos educativos de bajo costo ha crecido con el uso de tecnologías de manufactura aditiva, como es el caso de la llamada impresión 3D. Esta metodología se utiliza para construir estructuras mecánicas ligeras, con diseños fáciles de modificar y rentables para las universidades. Este método ha sido detallado en varios trabajos como una opción para implementar en laboratorios universitarios (Pandey et al., 2024). Además, este tipo de sistemas robóticos económicos permite a los estudiantes acceder a materiales experimentales que complementan el objetivo pedagógico propio de los programas académicos universitarios (Evripidou et al., 2020). Otro aspecto de interés es la comunicación inalámbrica con la que cuentan los brazos robóticos en general; esto ha posibilitado una mejora en las interacciones entre el usuario y el robot, dando paso a una integración adecuada entre las opciones de control y el trabajo desarrollado. En este sentido, una de las tecnologías más populares es la tecnología *bluetooth*, la cual tiene como principales características su bajo consumo de energía, la facilidad de gestión de los datos y la compatibilidad con otros dispositivos inteligentes. Investigaciones previas han demostrado buenos resultados experimentales en el sector educativo, ya que mejoran su rendimiento a través de la gestión de la movilidad del robot (Sathyamoorthy et al., 2022; Dalgic et al., 2019; Singh et al., 2025). Además, se ha confirmado la comunicación inalámbrica con sistemas de operación y control compartidos para mejorar la interacción entre el usuario y

el robot. Varios estudios han investigado el control remoto de robots con enlaces inalámbricos y han destacado su potencial como dispositivos educativos y experimentales (Zhang et al., 2009; Park et al., 2007). También se estudió la tecnología *bluetooth* de los sistemas robóticos y se han identificado su durabilidad e implicaciones durante las escenas de aprendizaje y pedagógicas (Coelho et al., 2006).

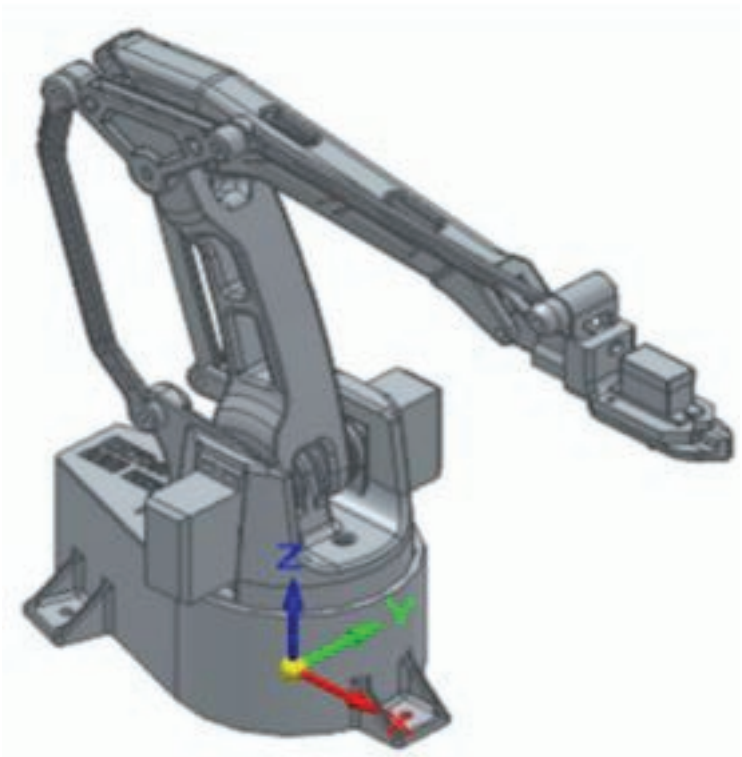
En la instrucción de robots, se demuestra que el equipo de educación en comunicación inalámbrica y la infraestructura de *software* pueden realizar un aprendizaje práctico y promover la enseñanza activa. Basado en otros hallazgos, se espera que el entorno educativo en la educación tenga el potencial de conectarse e interactuar activamente con el sistema robótico de una forma flexible y accesible, para que los estudiantes puedan interactuar directamente con el sistema robótico a través de interfaces flexibles y accesibles (Chaudhary et al., 2016). Con este objetivo, informamos aquí la preparación y diseño de un brazo robótico educativo impreso en 3D con comunicación *bluetooth* para la educación básica en robótica y automatización. Es una solución de *software* compleja que combina actuadores servomecánicos y un sistema de control integrado, incluyendo el control inalámbrico del brazo robótico a través de un módulo de comunicación *bluetooth*. Por lo tanto, se propone construir el sistema de plataforma educativa de bajo costo para el aprendizaje práctico como se presenta en las metodologías y actividades en el artículo de investigación especializado.

Materiales y metodología

El robot está hecho de partes mecánicas específicas que se diseñaron utilizando Solid Edge 2025, lo que permitió generar un modelo para cada elemento y su correspondiente ensamblaje mecánico. Este tiene la intención de ejecutar todo el sistema para que no se encuentren fallos de diseño o impresión. Aunque el robot no está diseñado para levantar objetos pesados ni realizar tareas altamente mecánicas, el uso de servomotores coloca una carga significativa en la estructura (65 g cada uno). Además, durante su operación, podría ocurrir una situación de bloqueo y una parte podría verse comprometida por un servomotor. Por ello, se

incluyeron varios componentes de soporte que ayudan a fortalecer la estructura y el control preciso del movimiento para este propósito. El efector es uno de los elementos más destacados del diseño, ya que es controlado únicamente con un servomotor, pero está impreso con los dos elementos en una estructura combinada de engranaje-efector. Esto elimina configuraciones complicadas o no simétricas, y también permite una apertura de hasta 180 grados. La base es otra parte crucial, pues aunque no tiene suficiente peso para soportar el robot por sí misma, proporciona una superficie externa sobre la cual se puede montar el resto del sistema y también es adecuada para la rotación completa del brazo robótico. La Figura 1 ilustra el ensamblaje del modelo del brazo robótico en Solid Edge 2025.

Figura 1. Ensamble brazo robótico en Solid Edge 2025



En la fase inicial del desarrollo de la electrónica, los materiales y las partes electrónicas se eligieron en función de la facilidad de acceso y la compatibilidad. Se seleccionó el ESP32 Wroom como el componente de control principal debido a sus características de conectividad Wi-Fi y *bluetooth* que permitirán el control remoto del robot y facilitarán diferentes formas de operación. También se integraron dispositivos de interacción como una pantalla LCD de 20 × 4 píxeles de resolución y un teclado matricial de 4 filas × 4 columnas, permitiendo la interacción del usuario con el sistema a través de un menú de modos y la captura de información. Se utilizaron dos placas ESP32: una para el control del usuario del sistema de servomotores, *joysticks* y teclado matricial, y una segunda para controlar solo la pantalla LCD, ya que la principal tenía la mayoría de los pines en operación. La Figura 2 representa el diagrama de conexión que coincide con la placa principal. En la Figura 3, se muestra el diagrama de la placa enfocada en controlar la pantalla LCD.

Figura 2. Diagrama electrónico ESP32 #1

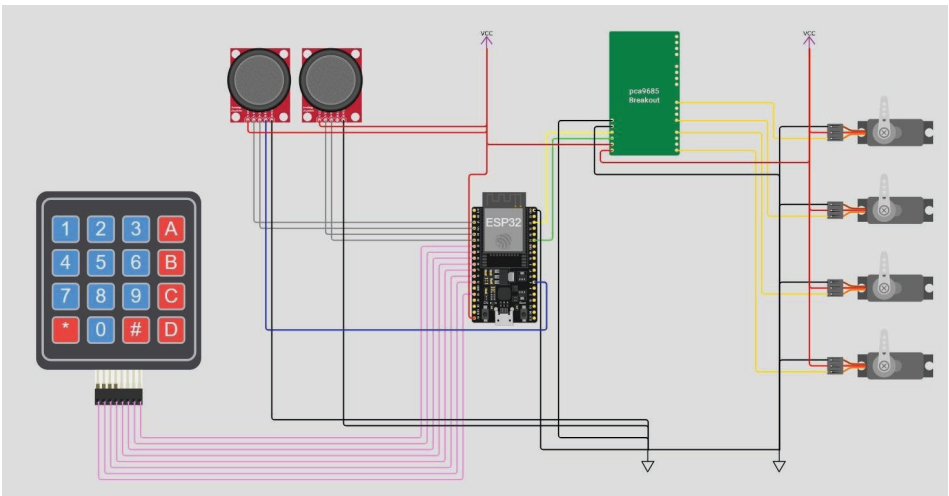
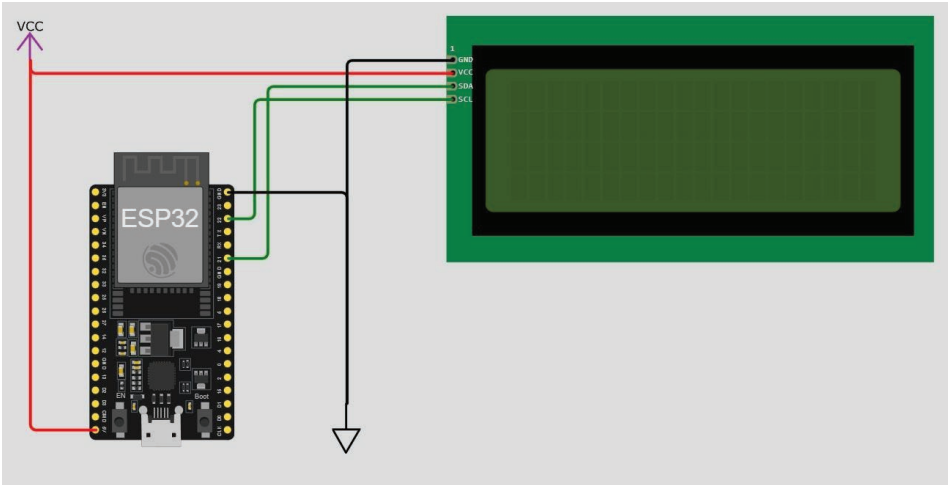


Figura 3. Diagrama electrónico ESP32 #2

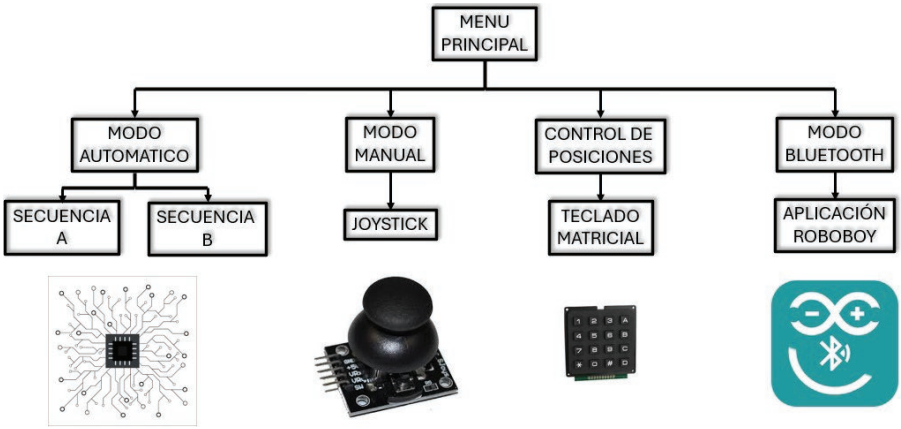


Ambas placas ESP32 están alimentadas de forma independiente. Es decir, no están conectadas directamente a la fuente de voltaje principal para evitar una posible sobrecarga, sino que son alimentadas por dos cargadores de teléfonos móviles convencionales, uno para cada placa ESP32. Por otro lado, los servomotores están alimentados independientemente de las placas ESP32 a través de una fuente de alimentación conmutada de 5 V a 10 A. Lo anterior solo describe el esquema de alimentación; el funcionamiento del sistema incluye otros elementos adicionales. La Figura 4 presenta cuatro modos de operación del robot: modo automático, modo manual (a través de los *joysticks*), control vía *bluetooth* y control de posición a través del teclado matricial.

Para acceder a cualquiera de esos cuatro modos, es necesario ingresar la opción correspondiente en el teclado matricial, siguiendo las instrucciones que se muestran en la pantalla LCD. El sistema guía al usuario hacia el modo de operación seleccionado una vez que se elige la opción. Aquí también mostramos los diferentes modos de operación del robot de una manera más cotidiana y comprensible:

El modo automático permite que el robot ejecute una secuencia de movimientos preprogramados de manera continua, automática, independiente de

Figura 4. Diagrama de operación



la intervención humana. Esta rutina continúa en un bucle hasta que finalice el tiempo asignado. Este enfoque es adecuado para considerar el funcionamiento del robot en su conjunto, ya que permite observar sus propias acciones. Luego se hace fácil realizar el control a través del modo manual, cuando se necesitan tareas más complejas. Los cuatro servomotores del robot son controlados con dos *joysticks*; cada uno controla dos servomotores diferentes, y los ejes (x, y) de cada *joystick* son controladores autónomos. Con eso, el usuario puede mover este robot de manera intuitiva y precisa según su preferencia. El movimiento del efector final está indicado por la señal del *joystick* y se muestra por separado en las Figuras 5 y 6. Así, ambos modos son flexibles e intuitivos, lo que permite realizar demostraciones automáticas tanto como un control personal y afinado.

Por fin, vemos un modo de control por *bluetooth*, la función más importante del diseño del sistema. Su programación es más exigente que la de los modos anteriores, pero proporciona más flexibilidad en el control del robot. Esta función se está integrando en el programa a través de una aplicación Roboboy que crea una conexión *bluetooth* entre el ESP32 y un teléfono móvil. Esta aplicación de la placa ESP32 para *bluetooth* ofrece mucha flexibilidad, pero también tiene sus limitaciones. Otro beneficio del control por *bluetooth* es que se puede comandar el robot mediante control de voz y la aplicación Roboboy también lo soporta, utilizando los comandos de voz del dispositivo móvil. Así, el usuario

Figura 5. Efector a 180°



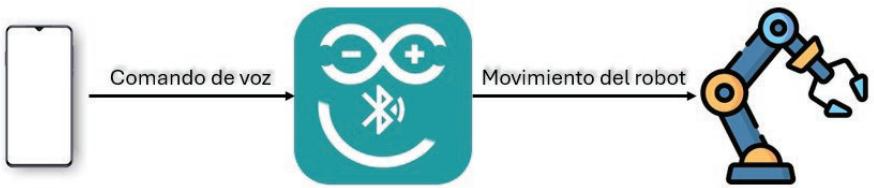
Figura 6. Efector a 0°



puede decidir escribir los comandos preestablecidos para realizar las tareas del robot, como se ilustra en la Figura 7. Otro beneficio es la capacidad de controlar el robot de forma remota, siempre que esté dentro de la distancia de conexión de *bluetooth* (alrededor de 10 m). Esto es especialmente beneficioso en entornos como aulas o laboratorios, porque el piloto puede comunicarse con el robot desde numerosos lugares en el entorno. Pero esto también tiene un problema: para hacerlo, es obligatorio controlar el sistema en una aplicación móvil, así como dentro del *software* para programar las opciones, haciendo que la implementación de movimientos no autorizados no esté disponible. Este escenario es similar al modo automático e ilustra algo que mejorar en trabajos futuros, para permitir que cualquier elemento del robot cambie su posición sin restricciones.

Otra ventaja es que, mientras el usuario se encuentre dentro del rango de

Figura 7. Diagrama de control *bluetooth*



conexión *bluetooth* de 10m, es posible controlar el robot de manera remota. Esto resulta particularmente útil en entornos como aulas o laboratorios, donde el operador puede interactuar con el robot desde distintos puntos del espacio.

Sin embargo, este modo presenta una desventaja importante, ya que es necesario configurar previamente las opciones de control dentro de la aplicación móvil y del programa, lo que limita la posibilidad de ejecutar movimientos no programados con anticipación. Esta situación es similar al modo automático y representa otro aspecto por mejorar en trabajos futuros.

Resultados

En este proyecto, se buscaron dos objetivos principales: el correcto funcionamiento del robot en cada uno de sus modos de operación, con énfasis en el control por *bluetooth*, y la validación del prototipo como herramienta de apoyo a la enseñanza. Por esta razón, los resultados se dividen en dos.

Los obtenidos a partir del funcionamiento del brazo robótico de tres grados de libertad fueron en general satisfactorios, confirmando su correcta operatividad y desempeño. Los movimientos programados se ejecutaron de manera fluida, mientras que las articulaciones respondieron adecuadamente a las señales provenientes del sistema de control, sin presentarse interrupciones ni fallas apreciables durante su operación. En la Figura 8 y la Figura 9 se pueden observar dos de las posiciones operacionales del robot ejecutadas mediante el control de posiciones del teclado matricial.

No obstante, se identificó un limitante de carácter estructural: la base del brazo robótico presentó una flexión moderada al realizar movimientos combinados que involucraban carga y extensión máxima. Si bien esta condición no afectó de manera significativa el funcionamiento global del sistema, sí representa un aspecto a considerar en términos de rigidez estructural, especialmente ante un uso prolongado o bajo cargas superiores.

Para saber cómo fue la interacción de los usuarios con el robot, se presentó a estudiantes de nivel medio superior y superior en escuelas del Instituto Politécnico Nacional. Los participantes tuvieron la oportunidad de manejarlo y ver cómo funcionaba en cada uno de sus modos. Al finalizar, se realizó una encuesta, la cual reúne los datos. Las gráficas y resultados obtenidos se muestran en la Figura 10.

Se demostró que el brazo robótico es una herramienta educativa efectiva al enseñar robótica, ya que permitió la demostración precisa de conceptos clave. La interacción directa con el prototipo ayudó a la comprensión de estos principios. Los resultados de la encuesta también expusieron una percepción positiva del sistema y una comprensión satisfactoria de los temas tratados. Estos hallazgos validan la utilidad del prototipo como un instrumento educativo que integra el aprendizaje teórico con una experiencia experimental práctica.

Figura 8. Robot a 180°

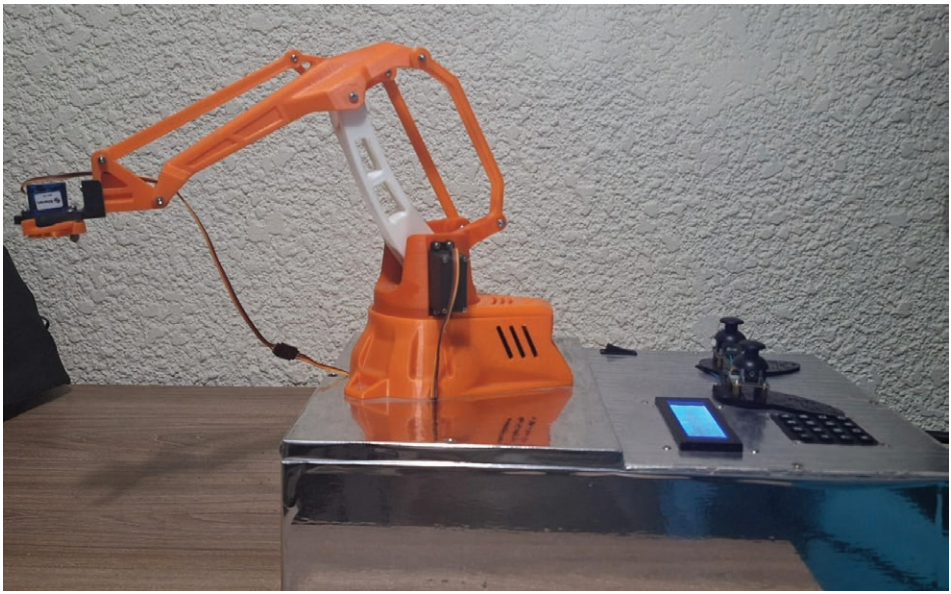


Figura 9. Robot a 0°

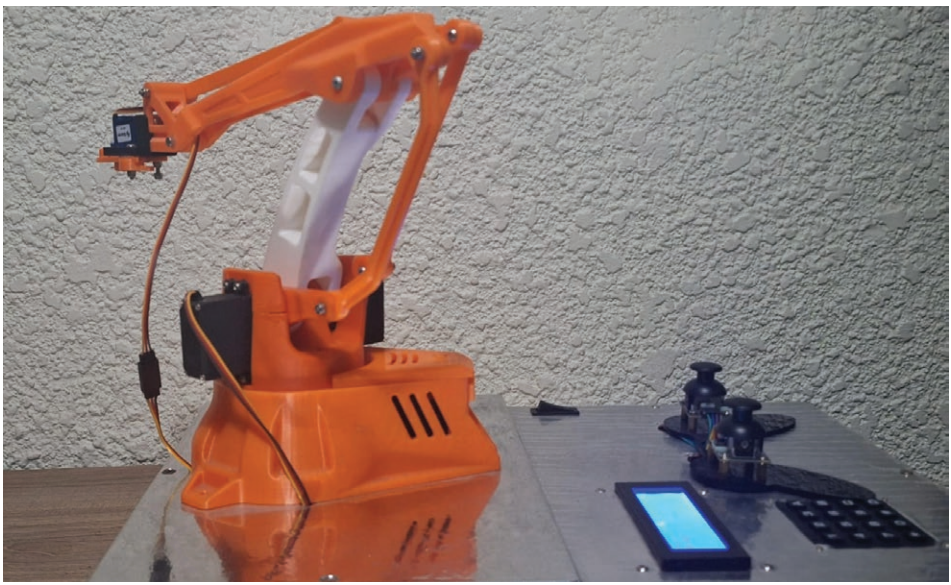
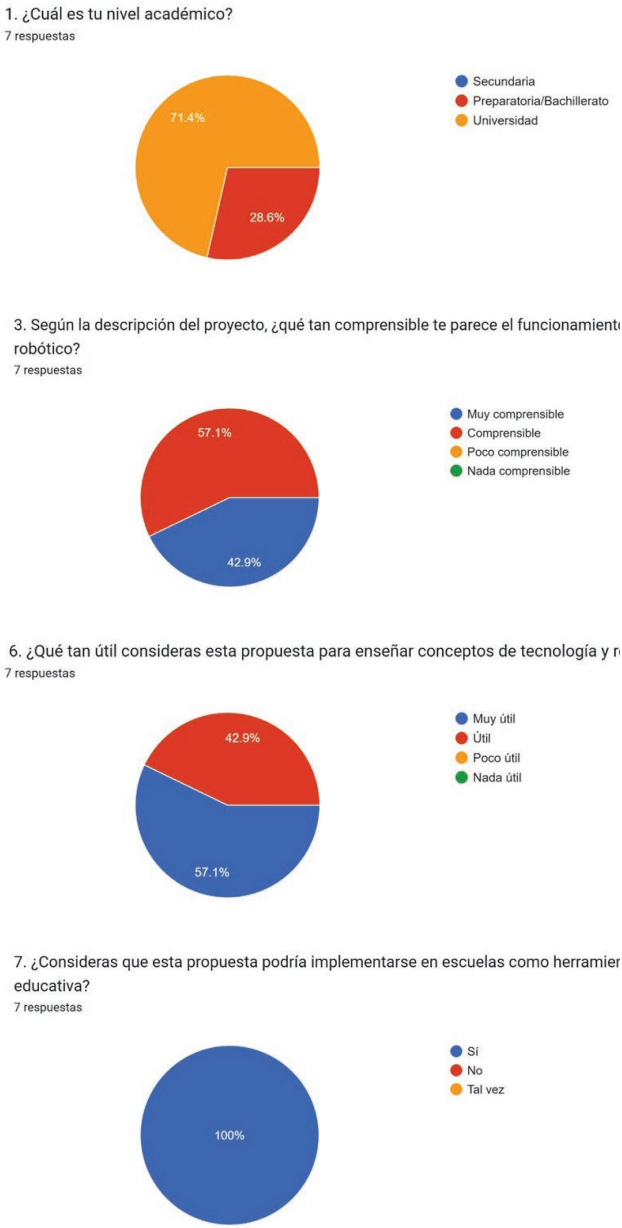


Figura 10. Resultados encuesta digital



Conclusiones

El brazo robótico impreso en 3D demostró un rendimiento estable en sus diversos modos de operación, confirmando que se lograron los objetivos propuestos. El diseño mecánico y electrónico parece ser un concepto alcanzable, dado que el sistema respondió de manera suficiente y fluida a las diferentes señales que el control había enviado. Un estudio estructural reveló que una pequeña cantidad de flexión en la base bajo carga y en condición de máxima extensión del prototipo de prueba no tuvo un impacto apreciable en su funcionalización. Esto, sin embargo, es una observación que nos indica reforzar o rediseñar esta parte en futuras versiones, tal vez cuando queramos mejorar la carga útil o el tiempo de operación.

El brazo robótico ha sido un dispositivo educativo útil para apoyar la formación en cursos de control, programación y cinemática. La interacción con el prototipo a través de una experiencia tangible en diferentes entornos fue beneficiosa para nosotros al apreciar estos temas, como se indicó en las encuestas positivas realizadas con estudiantes de ingeniería. Por último, pero no menos importante, el proyecto demuestra la perspectiva de la impresión 3D y las plataformas de control de bajo costo como medios convenientes de desarrollo para sistemas robóticos educativos. Como trabajo futuro, se propone mejorar la estructura, ampliar el control por *bluetooth* y adoptar nuevos modos de interacción para mejorar el efecto educativo.

Referencias

Chaudhary, V., Agrawal, V., Sureka, P. y Sureka, A. (2016, 2-4 de diciembre). *An Experience Report on Teaching Programming and Computational Thinking to Elementary Level Children Using Lego Robotics Education Kit*. 2016 IEEE Eighth International Conference on Technology for Education (T4E), Mumbai, India. https://doi.org/10.1109/T4E.2016.016

Coelho E. T., Carvalhal, P., Ferreira, M. J., Silva, L. F., Almeida, H. y Santos, C. (2006, 17-20 de diciembre). *A Bluetooth-based Wireless Distributed Data*

Acquisition and Control System. 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Kunming, China. https://doi.org/10.1109/ROBIO.2006.340258

Dalgic, O., Tekin, A. y Ugurlu, B. (2019, 14-17 de octubre). *An Experimental Study of a Bluetooth Communication System for Robot Motion Control*. IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal. https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927130

Evripidou, S., Georgiou, K., Doitsidis, L., Amanatiadis, A. A., Zinonos, Z. y Chatzichristofis, S. A. (2020). Educational robotics: platforms, competitions and expected learning outcomes. *IEEE Access, 8*, 219534-219562. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042555

Pandey, A., Zinzuvadia, D., Rughani, M. y Sayyad, J. (2024, 20-22 de junio). *Development of a Low-Cost Gesture Controlled 3-axis Robotic System*. 2024 6th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE), Shillong, India. https://doi.org/10.1109/ICEPE63236.2024.10668884

Park, H., Lim, Y.-A., Pervez, A., Lee, B.-C., Lee, S.-G. y Ryu, J. (2007, 17-20 de octubre). *Teleoperation of a Multi-Purpose Robot Over the Internet Using Augmented Reality*. 2007 International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul. https://doi.org/10.1109/ICCAS.2007.4406776

Sathyamoorthy, B., Umapathy, S. y Rajalakshmi, T. (2022, 23-24 de septiembre). *Automatic Robotic Arm Based on Bluetooth Regulated for Progressed Surgical Task*. 2022 International Conference on Industry 4.0 Technology (I4Tech), Pune, India. https://doi.org/10.1109/I4Tech55392.2022.9952598

Shibata, M., Demura, K., Hirai, S. y Matsumoto, A. (2021). Comparative Study of Robotics Curricula. *IEEE Transactions on Education, 64*(3), 283-291. https://doi.org/10.1109/TE.2020.3041667

Singh, S., Sharma, A., Malik, P. K., Mahajan, A., Krishna, G. y Lande, J. (2025). *Arduino-Based Robotic Arm Controlled via Bluetooth*. 2025 IEEE 7th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), Greater Noida, India. https://doi.org/10.1109/ICCCA66364.2025.11325525

Zhang, L., ZhiXin, C. y Jia, W. (2009, 20-22 de noviembre). *A networked teleoperation system for mobile robot with wireless serial communication*. 2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Shanghai. https://doi.org/10.1109/ICICISYS.2009.5358245

Diseño y desarrollo de un titulador ácido-base automatizado para su uso en clase STEAM

Liliana Cajero Sotelo,[a,b*] Manuel Eduardo Serrano Nava,[a] Yazmin Alejandra Ortega Jaramillo,[b] Miguel Ángel Román Olivares[b]

Abstract

This project presents the design and development of a low-cost automated educational titrator, called Titrator STEAM, as an alternative for use in STEAM-focused classrooms. The system integrates an Arduino-based microcontroller, a pH sensor, and a peristaltic pump to perform automated acid-base titrations while recording volumetric and pH data in real time. The collected data allows students to generate and analyze titration curves and their derivatives, linking chemical neutralization processes with mathematical models of change. The prototype was calibrated volumetrically and electrochemically, demonstrating its accuracy, reproducibility, and educational viability. Its open-source design, affordability, and adaptability make it a practical alternative to commercial titrators.

Keywords: transversality, pH, didactic, Arduino.

Introducción

La educación media superior en México enfrenta el reto de desarrollar aprendizajes significativos que integren el conocimiento teórico con la aplicación práctica, especialmente en el área de las ciencias naturales (Magallanes Delgado

[a] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[b] Centro de Estudios Tecnológicos, Industrial y de Servicios Núm. 43 (CETis 43), Dirección General de Educación Tecnológica, Industrial y de Servicios (DGETI).
[*] Autor de correspondencia: liliana.cajero@uaem.edu.mx

y Rangel Bernal, 2025). En este contexto, el enfoque STEAM (por sus siglas en inglés: ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas) se ha consolidado como una estrategia pedagógica que favorece la transversalidad, el pensamiento crítico y la resolución de problemas reales (Martínez Hernández y Pascuas Rengifo, 2025). Dentro de este marco, la enseñanza de fenómenos químicos, como las reacciones de titulación ácido-base, y el análisis matemático del cambio del potencial de hidrógeno (pH) representan una oportunidad para articular contenidos de química, matemáticas y tecnología en experiencias de aprendizaje integradoras.

Sin embargo, en la práctica educativa persisten limitaciones importantes. Las titulaciones ácido-base en el aula suelen realizarse mediante métodos cualitativos, como el uso de indicadores visuales, o bien se sustituyen por recursos audiovisuales como simuladores. Estas estrategias restringen la obtención de datos cuantitativos precisos y dificultan la construcción de curvas de titulación y su análisis matemático, lo que genera una brecha entre la teoría y la práctica experimental. Como consecuencia, los estudiantes tienen dificultades para comprender la relación entre el comportamiento químico del pH y su modelado funcional, limitando el desarrollo de competencias científicas fundamentales.

Estudios recientes señalan que la integración de tecnologías digitales y plataformas en la educación STEAM mejora la motivación, la comprensión y el aprendizaje activo del alumnado (Veytia Bucheli y Contreras Fuentes, 2023; Domínguez Osuna et al., 2021; Chimborazo Carrer et al., 2025; Juškevičienė, 2020; Montero-Izquierdo et al., 2024). De igual manera, existen trabajos sobre el uso de microcontroladores Arduino para el desarrollo del pensamiento computacional y la automatización de procesos experimentales en contextos educativos (Prendes Espinosa y Cerdán Cartagena, 2021; Marín Marín et al., 2024). Asimismo, se han documentado experiencias en la construcción de instrumentos científicos de bajo costo —como tituladores automáticos (Kosenkov y Kosenkov, 2021; Famularo et al., 2015; Arellano et al., 2022), sistemas de monitoreo químico (Delgado-Castro y Rojas-Bolaños, 2015; Dung et al., 2022) y dispositivos de adquisición de datos (Azúa-Barrón et al., 2017; Vallejo et al., 2020)—, los cuales permiten el acceso a la experimentación científica y fortalecen la

transversalidad curricular. No obstante, la implementación de este tipo de soluciones aún es limitada en laboratorios escolares de nivel medio superior debido a restricciones económicas y falta de recursos didácticos.

Ante este panorama, el presente trabajo plantea la hipótesis de que el uso de un microcontrolador Arduino, junto con componentes electrónicos de bajo costo como sensor de pH y bomba peristáltica, permite el diseño y construcción de un titulador ácido-base automático funcional, el cual se denominó Titrator STEAM, mismo que es viable para su implementación como alternativa didáctica en actividades experimentales con enfoque STEAM en la educación media superior.

Materiales y metodología

Los componentes que se utilizaron para el desarrollo del prototipo Titrator STEAM fueron un microcontrolador Arduino UNO, un sensor de pH con electrodo de vidrio y módulo conversor PH-502C, una bomba peristáltica de 12 V controlada mediante un *driver* L298N, una fuente de alimentación, cableado estructurado y una caja protectora. Como recursos de *software* se emplearon Arduino IDE para la programación del sistema embebido, y Python para el desarrollo de la interfaz gráfica y el registro de datos.

La metodología del diseño y desarrollo del titulador automático se llevó a cabo de la siguiente manera:

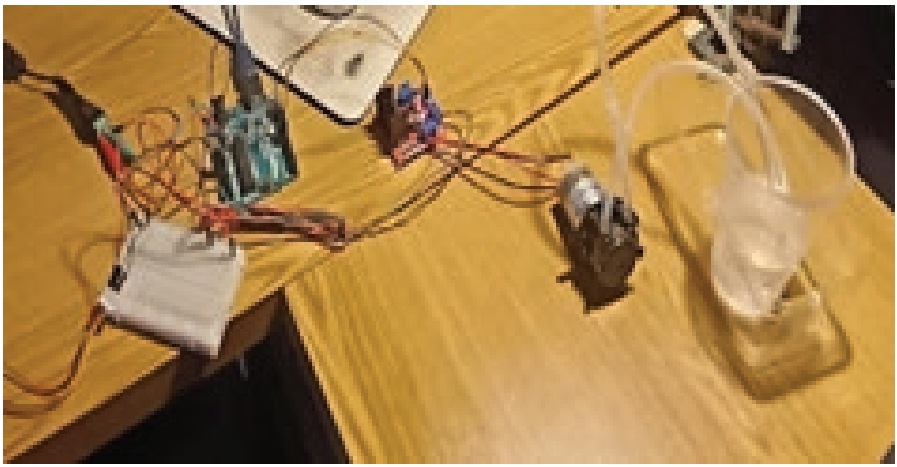
Planeación y diseño

Se definió el principio de funcionamiento del sistema, que consiste en regular el flujo de una bomba peristáltica en función de la lectura de un sensor de pH tipo PH-502C, conectado a un microcontrolador Arduino UNO que actúa como unidad de control y adquisición de datos, como se puede observar en la Figura 1.

El módulo PH-502C se utilizó para convertir las variaciones de voltaje generadas por el electrodo de vidrio en una señal analógica proporcional al pH (0-14). Previamente, se realizó un ajuste físico del potenciómetro del módulo,

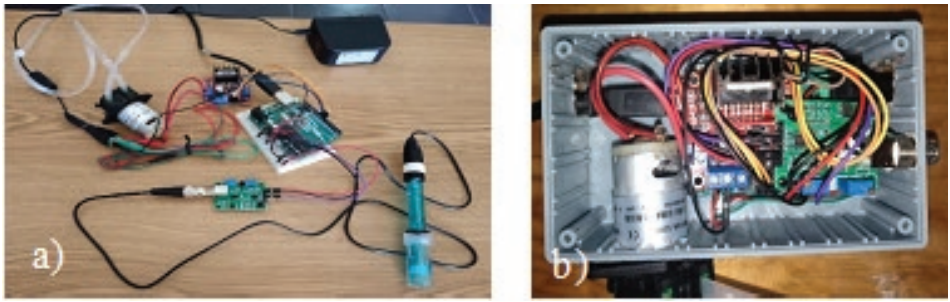
calibrando la salida en 2.5 V en circuito abierto (corto circuito de entrada) para centrar el rango de lectura y garantizar la capacidad de medir desde pH 0 hasta 14 con resolución adecuada.

Figura 1. Calibración de bomba



Durante la fase inicial, todos los componentes se montaron sobre una *protoboard*, tal como se observa en la Figura 2a, para realizar las pruebas eléctricas, de comunicación serial y control *pulse width modulation* (PWM). Posteriormente, tras validar el funcionamiento, el sistema completo se integró dentro de una caja protectora para aislarlo del ambiente y evitar interferencias o salpicaduras. En el diseño final, solo quedaron accesibles tres elementos: la entrada de voltaje de 12 V; el conector USB para comunicación y alimentación del Arduino, y la interfaz del sensor de pH. En la Figura 2b se observa el ensamble final del titulador.

Figura 2. Ensamble inicia y final del Titrator STEAM



Desarrollo del software embebido (Arduino)

Se programó el Arduino UNO para:

- Leer el valor analógico del sensor de pH y convertirlo a unidades de pH mediante una interpolación lineal multisegmento, definida por los tres puntos de calibración almacenados en EEPROM.
- Controlar la bomba peristáltica mediante salidas digitales y PWM, ajustando su velocidad proporcionalmente a la diferencia entre el pH actual y el objetivo.
- Comunicar continuamente con la interfaz Python a través del puerto serial, enviando los datos en formato "PH,<valor>, VOL,<valor>" para su registro y elaboración de gráfica en tiempo real.
- Permitir la ejecución de comandos remotos desde la interfaz (inicio, detención, purga y calibración).

El algoritmo de control implementa una lógica proporcional simplificada:

- Si el error entre pH actual y objetivo es grande, la bomba opera al 100 % del PWM.
- A medida que el valor se aproxima al objetivo, el PWM disminuye progresivamente hasta detener la bomba al alcanzar el pH deseado.

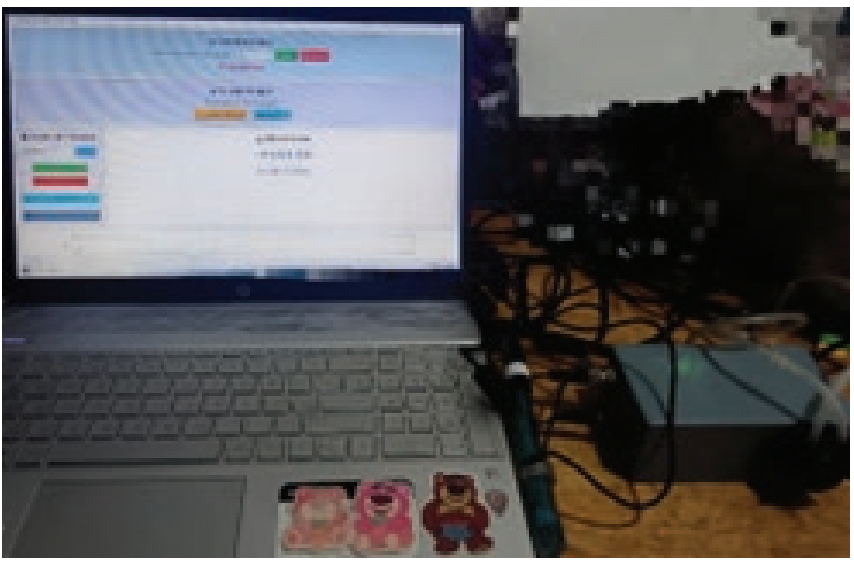
Desarrollo del software *de interfaz (Python)*

Se diseñó una aplicación gráfica con *tkinter*, que permite:

- Conectar y desconectar el Arduino.
- Ejecutar la calibración interactiva paso a paso (pH 4, 7 y 10).
- Iniciar, detener y purgar la bomba peristáltica.
- Establecer el pH objetivo.
- Mostrar en tiempo real la curva "volumen suministrado (mL) vs. pH", utilizando Matplotlib.
- Guardar los datos experimentales en archivos CSV con fecha y hora.

El programa utiliza procesamiento en paralelo (*threading*) para leer el puerto serial sin bloquear la interfaz gráfica, actualizando en tiempo real tanto los valores numéricos como la curva de titulación. El ensamble final con la interfaz abierta es presentado en la Figura 3.

Figura 3. Modelo final del Titrator STEAM



Calibración volumétrica, electroquímica y validación experimental

Para asegurar la validez de los datos, se efectuaron tres procesos de calibración complementarios:

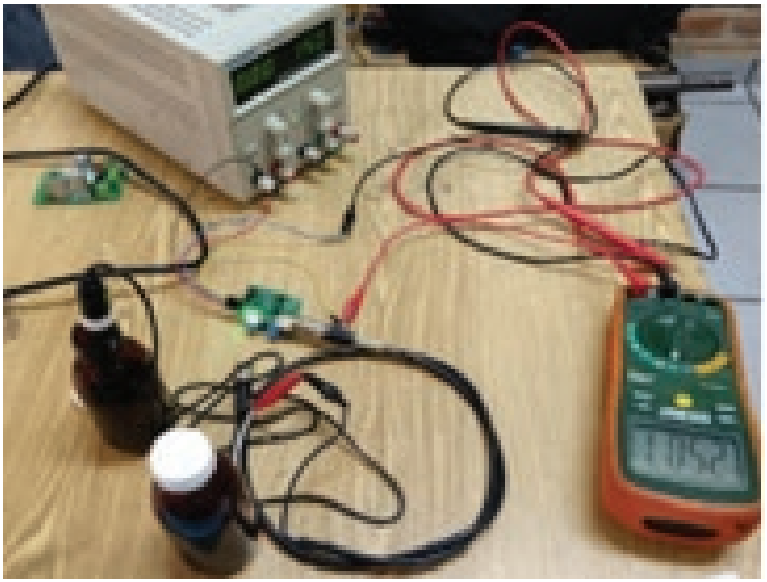
1) Calibración volumétrica: se calibró el volumen entregado por segundo (mL/s) de la bomba peristáltica, utilizando el Arduino UNO y el control PWM como variable independiente. Se realizaron pruebas a distintos valores de PWM (100, 150, 200 y 255), recolectando el volumen suministrado en un minuto, además de promediando tres repeticiones por punto. Con los datos obtenidos, se construyó una curva de calibración PWM vs. flujo volumétrico, empleada posteriormente para calcular el volumen suministrado en tiempo real durante la titulación.

2) Calibración electroquímica: el sensor de pH se calibró físicamente usando tres soluciones buffer estándar (pH 4.00, 7.00 y 10.00). Para ello:

- Se ajustó previamente el módulo PH-502C a 2.5 V en corto circuito (modo referencia).
- Se midieron los valores de salida analógica en cada solución patrón.
- Se almacenaron los valores correspondientes en la memoria EEPROM.
- Este procedimiento permitió definir una escala lineal de conversión voltaje-pH, cubriendo el rango completo de 0 a 14 unidades. En la Figura 4 se muestra la calibración del electrodo con los buffers.

3) Validación experimental: Con ambos sistemas calibrados, se realizaron titulaciones reales sobre soluciones buffer, registrando continuamente los valores de pH y volumen. Las curvas obtenidas mostraron el comportamiento esperado de una titulación ácido-base, con puntos de inflexión definidos, confirmando la precisión y reproducibilidad del sistema automatizado.

Figura 4. Calibración del electrodo



Resultados

Se diseñó, ensambló y evaluó el funcionamiento del titulador automático Titrator STEAM. La Figura 5 muestra una curva de titulación obtenida mediante la neutralización de ácido acético con hidróxido de sodio (NaOH) 0.002 M, con la cual se corroboró el funcionamiento del prototipo.

Dicha curva se logró descargar en formato CSV, se graficó y se obtuvo su primera derivada en *Origin* para poder identificar el punto de inflexión, que es donde se encuentra el punto de equilibrio en la curva de titulación, tal como se observa en la Figura 6, en la cual se puede observar también la gráfica de la primera derivada de la curva de titulación que, en este caso, fue a un pH de 8.59, gastándose 44.48 mL de NaOH.

Figura 5. Pantalla de la aplicación del Titrator STEAM

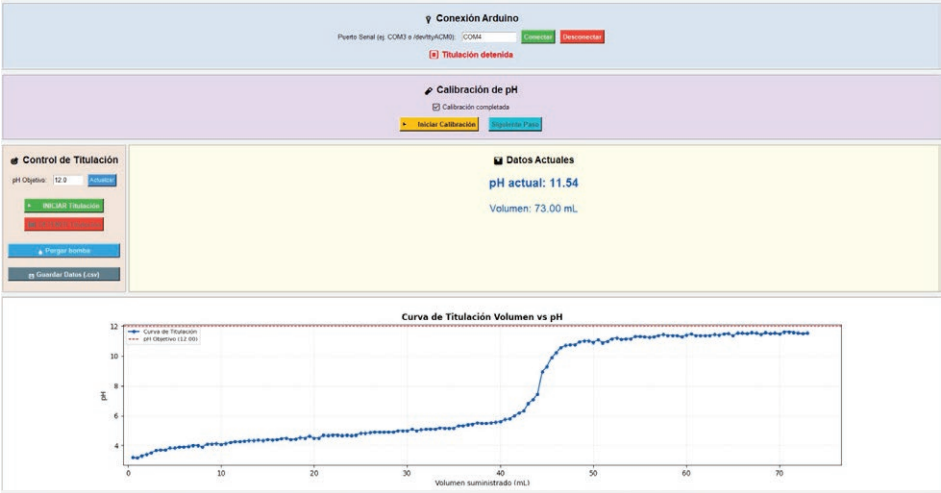
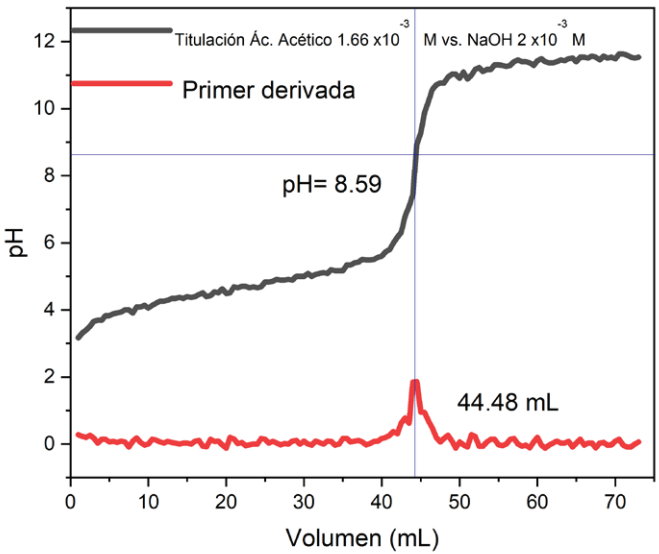


Figura 6. Primera derivada de la curva de titulación

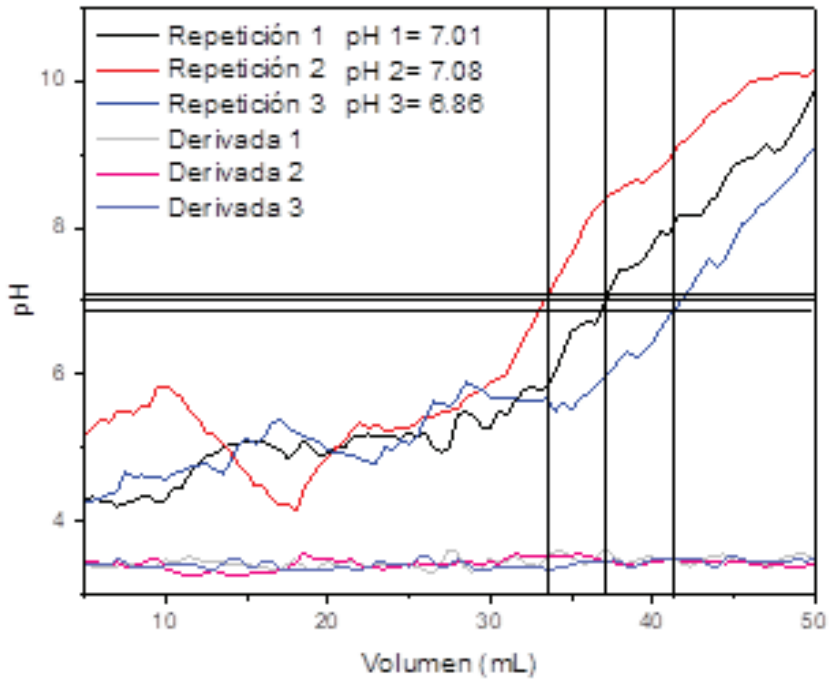


Haciendo uso de este aditamento, se puede realizar una actividad con enfoque transversal STEAM en las asignaturas Química (ácidos y bases, pH) y Cálculo Diferencial (modelado de fenómenos de cambio con funciones).

Prueba de repetibilidad y estimación de error asociado

Finalmente, se realizaron tres corridas consecutivas de una titulación ácido-base para evaluar la repetibilidad en las mediciones del equipo Titrator STEAM. Las titulaciones se realizaron con una solución 0.002 M de ácido acético y de NaOH diluido; las reacciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente. Los resultados se observan en la Figura 7.

Figura 7. Repetibilidad



Para la estimación del error en la medición de pH se utilizaron los tres valores de pH en el punto de equilibrio de las reacciones efectuadas y se realizó un breve análisis estadístico, el cual se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de Repetibilidad

Parámetro	Valor
Valor 1	7.010
Valor 2	7.080
Valor 3	6.860
Media aritmética	6.980
Desviación estándar experimental (población)	0.091

La desviación estándar (±0.091) representa el error aleatorio experimental asociado a la medición, el cual es menor al intervalo de confianza reportado por Delgado Méndez et al. (2008), que fue de ± 0.11, lo que indica confiabilidad para su uso en clases a nivel de bachillerato en México.

Comparación con trabajos anteriores

En estudios publicados como el de Kosenkov y Kosenkov (2021), se presentan sistemas de titulación automática con integración de visión por computadora y conectividad digital avanzada. Si bien dichos desarrollos representan aportaciones significativas dentro de la automatización instrumental universitaria, su orientación principal es tecnológica y experimental.

En contraste, el Titrator STEAM:

- Está diseñado específicamente para el nivel medio superior, atendiendo el contexto curricular mexicano.

- Incorpora de forma explícita el análisis matemático del fenómeno químico mediante la obtención de la curva de titulación para su posterior análisis diferencial.
- Utiliza un algoritmo de control proporcional simplificado intencionalmente didáctico, comprensible y replicable por estudiantes.
- Integra *hardware* y *software* como parte del proceso formativo, no solo como herramienta de medición.

Asimismo, aunque el trabajo de Arellano Díaz et al. (2022) reporta la automatización de una valoración ácido-base con fines educativos, la presente propuesta amplía dicho enfoque al incorporar:

- Interfaz gráfica propia en Python con visualización en tiempo real.
- Comunicación serial estructurada para adquisición continua de datos.
- Protocolo sistemático de triple calibración (volumétrica, electroquímica y validación experimental).
- Integración formal del análisis diferencial como parte del diseño pedagógico.

El presente trabajo propone una reconceptualización del titulador automático en educación media superior: no como sustituto del método manual, sino como plataforma para el análisis cuantitativo del cambio y la modelación matemática del fenómeno químico. Esta perspectiva contribuye a cerrar la brecha entre experimentación y formalización matemática, identificada en la literatura como una limitación recurrente en la enseñanza de ciencias.

Conclusiones

Se logró diseñar el circuito electrónico y la programación del sistema automatizado mediante una tarjeta Arduino UNO, con Arduino y Python, garantizando la medición y el registro precisos de valores de pH en tiempo real. Asimismo, se integraron de manera funcional y segura los componentes electrónicos y

mecánicos —sensor de pH, bomba peristáltica, controladores y eliminador de corriente—, obteniéndose un desempeño estable y confiable durante las pruebas experimentales.

El objeto de aprendizaje realizado (titulador automático), cumple con las características de la transversalidad STEAM, ya que relaciona las ciencias como la química (pH), matemáticas (curva de titulación, primera diferencial), la tecnología Arduino y Python, además de la ingeniería y el arte del armado y programación del objeto, respectivamente.

Por otra parte, se desarrolló una interfaz didáctica intuitiva, permitiendo a los usuarios visualizar de forma clara las curvas de titulación generadas, así como descargar los datos obtenidos para su análisis.

En conjunto, los resultados evidencian que el Titrator STEAM constituye una herramienta educativa innovadora, funcional, con resultados reproducibles y accesible que puede ser utilizada en clases con enfoque STEAM.

Referencias

Arellano Díaz, S. M., Hurtado Chávez, J. L., Ruelas Abonce, A. y Tristán Flores, F. E. (2022). Automatización de una valoración volumétrica ácido-base como prototipo educativo. *Educación Química, 33*(3). https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2022.3.81328

Azúa-Barrón, M., Vázquez-Peña, M. A., Arteaga-Ramírez, R. y Hernández-Saucedo, R. (2017). Sistema de adquisición de datos de bajo costo con la plataforma Arduino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8*(1), 1-12. https://www.redalyc.org/pdf/2631/263149891001.pdf

Chimborazo Carrer, E. C., Chila Saltos, M. M., Mora Pereira, J. S., Alvarado Benítez, D. M., Benites Villalta, J. V. y Escalante Rodríguez., T. E. (2025). STEAM y aprendizaje activo como enfoque educativo. *Revista G-ner@ndo, 6*(1), 4262-4279. https://revista.gnerando.org/revista/index.php/RCMG/article/view/600/628

Delgado Méndez, M. A., Vanegas Carvajal, M. y Delgado Alvarado, G. (2008). Metrología Química II: Estimación de la Incertidumbre en la Medición de

pH en Aguas. *Universitas (León), 2*(1), 8-18. https://doi.org/10.5377/universitas.v2i1.1638

Delgado-Castro, A. y Rojas-Bolaños, O. (2015). Construcción de un sistema de bajo costo para el uso y evaluación de sensores semiconductores para gases. *Educación Química, 26*(4), 299-306. https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.07.001

Domínguez Osuna, P. M., Oliveros Ruiz, M. A. y Mateos Anzaldo, F. D. (2021). Capacitación docente en tiempos de pandemia: Experiencia en el uso de material didáctico STEAM en línea. *Caleidoscopio: Revista Semestral de Ciencias Sociales y Humanidades, 81*(51). https://doi.org/10.33064/51crscsh4339

Dung, K., Huy, Q., Huyen, T., Viet, Q. y Linh, N. (2022). A low-cost system for monitoring pH, dissolved oxygen and algal density in continuous culture of microalgae. *HardwareX, 12*, e00353. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00353

Famularo, N., Kholod, Y. y Kosenkov, D. (2015). Integrating Chemistry Laboratory Instrumentation into the Industrial Internet: Building, Programming, and Experimenting with an Automatic Titrator. *Journal of Chemical Education, 93*(1), 175-181. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00494

Juškevičienė, A. (2020). STEAM Teacher for a day: a case study of teachers' perspectives on computational thinking. *Informatics in Education, 19*(1), 33-50. https://doi.org/10.15388/infedu.2020.03

Kosenkov, D. y Kosenkov, Y. (2021). Computer vision in chemistry: automatic titration. *Journal of Chemical Education, 98*(12), 4067-4073. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00810

Magallanes Delgado, M. y Rangel Bernal, L. (2025). Marco curricular de educación media superior en México: una escuela abierta y orientadora. *Educación y Ciencia, 29*(2), e.18180. https://doi.org/10.19053/uptc.0120-7105.eyc.2025.29.e18180

Marín Marín, J. A., García-Tudel, P. A. y Duo-Terró, P. (2024). Computational thinking and programming with Arduino in. *Heliyon, 10*(8), e29177. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29177

Martínez Hernández, N. A. y Pascuas Rengifo, Y. S. (2025). Implementación del enfoque STEAM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Artes y Matemáticas) en la educación secundaria alta: revisión sistemática de metodologías, temáticas y formación de ciudadanos activos. *Revista Virtual Universidad Católica Del Norte*, (76), 254-294. https://doi.org/10.35575/rvucn.n76a10.

Montero-Izquierdo, A., Jin Su, J. y David, G.-G. (2024). A future classroom lab with active and gamified STEAM proposal for mathematics and science disciplines: Analyzing the effects on pre-service teacher's affective domain. *Heliyon, 10*(16), e35911. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35911

Prendes Espinosa, M. P. y. Cerdán Cartagena, F. (2021). Tecnologías avanzadas para afrontar el reto de la innovación educativa. *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia, 24*(1), 35-53. https://doi.org/10.5944/ried.24.1.28415

Vallejo, V., Diaz-Uribe, C. y Fajardo, C. (2020). Do-it-yourself methodology for calorimeter construction based in Arduino data acquisition device for introductory chemical laboratories. *Heliyon, 6*(3), e03591. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03591

Veytia Bucheli, M. G. y Contreras Fuentes, Y. B. (2023). Tendencias investigativas acerca del método STEAM en México. *Transdigital, 6*(11), e422. https://doi.org/10.56162/transdigital422

Efectividad de la biofertilización sobre el crecimiento vegetativo en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.)

Yessica Flor Cervantes-Adame,[a*] Cid Aguilar-Carpio,[b] Paulina Osorio-Olivera,[a] Elizabeth Broa-Rojas,[a] Gregorio Bahena-Delgado[a]

Abstract

Rice production in Mexico faces a severe crisis. The purpose of this research was to identify the effect of different biofertilizers and bio-rooters on the vegetative stage of rice. The study was conducted at the Xalostoc Higher Education School. The treatments consisted of the application of Armoseed (*Azotobacter vinelandi*, *Rhizobium etli*, *Bacillus subtilis*, *Burkholderia vietnamensis*, *Trichoderma harzianum*, *Micromonospora echinospora*) at 2 L ha, Bioenraizer (Indolebutyric acid, Cytokinins, Humic amino acids) at 2 L ha^{-1}, Bioeves (*Azospirillum lipoferum*, *Rhizophagus irregularis*, *Trichoderma* spp.) at 2 L ha^{-1}, chemical fertilization (120-40-40), and a control with no application. A completely randomized block design with 10 replicates was used. Four response variables were evaluated and analyzed using SAS software version 9.0. The results showed the Armorseed treatment as having the greatest effect on plant height, dry weight, and absolute growth rate.

Keywords: microorganisms, crop, production.

[a] Laboratorio de suelos agrícolas, Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, UAEM.
[b] Posgrado de Botánica, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.
[*] Autor de correspondencia: yessica.cervantes@uaem.mx

Introducción

El cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) está presente en la dieta de la mayoría de los mexicanos por lo que, sin duda, este es de gran importancia; sin embargo, a través de los años se ha reflejado una significativa disminución en su producción. Al ser este cultivo básico en la dieta mexicana, se estima un consumo de 8.5 kg per cápita al año (Ireta, 2023). La producción de arroz en México, según datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2024), se concentra en los estados de Nayarit, Campeche, Michoacán y Veracruz, los cuales superan el 80 % de la producción nacional, siendo el arroz palay el de mayor producción con niveles significativos de más de 246,000 toneladas durante 2022. Actualmente, se estima una producción de 219,000 toneladas con rendimiento de 7.0 ton/ha^{-1} y en donde el país depende de importaciones, cubriendo apenas una quinta parte de la demanda interna (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2024). En Morelos, este cereal se siembra en 16 municipios, siendo Cuautla, Xochitepec, Temixco y Emiliano Zapata los de mayor superficie de siembra con 270, 84, 74 y 69 toneladas. En general, los rendimientos de este cultivo son de 10 ton/ha^{-1}, y debido a la urbanización cada vez hay menor superficie agrícola destinada a este cultivo (Matamoros et al., 2020).

La producción de arroz en México enfrenta una crisis severa, con una caída de casi el 90 % en la producción nacional. Las principales causales de ello son los altos costos de producción, menor superficie de siembra, la problemática en de escasez de agua (este cultivo uno de los que más requiere agua para una buena producción agrícola), el cambio climático (el aumento de la temperatura afecta el desarrollo del cultivo, disminuyendo significativamente los rendimientos) y los problemas fitosanitarios (la presencia de plagas y enfermedades impactan la producción del arroz) (Ireta-Paredes, et al., 2017). Por lo anterior, se plantean estrategias para contrarrestar los efectos negativos en la producción agrícola y que, además, sean de beneficio al cultivo (Cervantes Adame et al., 2024), Una de ellas es el uso de microorganismos benéficos como una alternativa de biofertilización, la cual ha tenido una amplia difusión en los últimos años debido a su

efecto positivo sobre el crecimiento radical, desarrollo y producción en diversos cultivos (Canizalez-Silva et al., 2024). Otra alternativa es el uso de reguladores de crecimiento como una opción complementaria; dicha estrategia ha tenido impactos positivos en el tejido celular vegetal, promoviendo el crecimiento y acelerando la formación radicular, lo cual se traduce en un beneficio directo en el crecimiento de las plantas (Martínez Reyes et al., 2018). En este contexto, el propósito de la presente investigación se centró en identificar el efecto de diferentes fertilizantes biológicos y bioenraizadores en etapas vegetativas de arroz.

Materiales y metodología

El trabajo de investigación fue establecido en un invernadero tipo túnel, estructurado con malla antiáfidos en las paredes y plástico blanco en la parte superior, el cual se encuentra ubicado en la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, Ayala, Morelos, México. En general, la zona presenta un clima cálido y semiárido, típico del clima cálido subhúmedo donde la mayor parte del año presenta temperaturas que van de 22 °C a 30 °C. La evaluación agronómica se realizó mediante un experimento de campo conducido bajo condiciones de invernadero durante el periodo de junio-noviembre de 2025. Las fuentes de aplicación estuvieron conformadas por Armoseed, Bioenraizer, Bioeves (aplicados a una dosis de 2 L ha), fertilización química (120-40-40) y un testigo sin aplicación (Tabla1). Como material vegetal, se utilizó semilla de la variedad arroz Morelos 2017. La aplicación de los tratamientos se realizó a través de riego localizado, aplicados cada quince días en un periodo no mayor a 45 días hasta el desarrollo de la planta. La parcela agrícola se dividió en noventa bioespacios de siembra de manera individual, cada uno de estos contaba con cinco plantas de arroz. La investigación se analizó con el diseño estadístico de bloques aleatorizado conformado por cinco tratamientos de efecto biológico y químico, cada uno constituido por diez réplicas. Los datos obtenidos se determinaron bajo evaluación de diferencias entre las medias DMS ($\alpha = 0.01$). El *software* utilizado para esto fue Statistical Analysis System (SAS) versión 1999.

Tabla 1. Tratamientos bajo estudio a base de fertilizantes biológicos y bioenraizadores

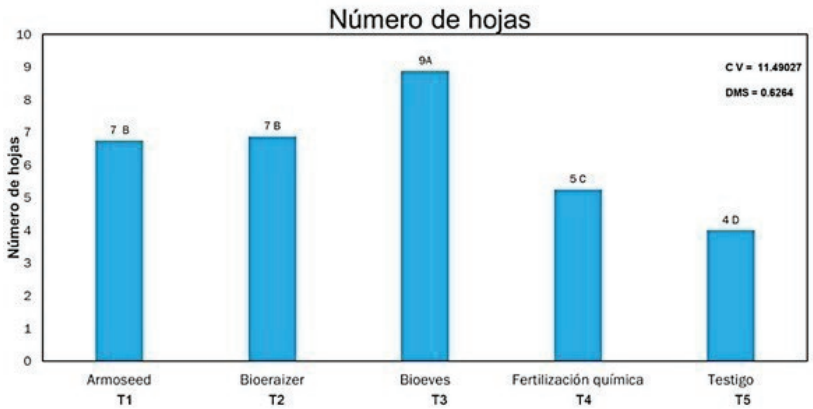
Núm.	Tratamiento	Contenido	Dosis
1	Armoseed	*Azotobacter vinelandi, Rhizobium etli, Bacillus subtilis, Burkholderia vietnamensis, Trichoderma harzianum, Micromonospora echinospora*.	2 L ha^{-1}
2	Bioenraizer	Ácido indol butírico, citoquininas, aminoácidos, húmicos.	2 L ha^{-1}
3	Bioeves	*Azospirillum lipoferum, Rhizophagus irregularis, Trichoderma* spp.	2 L ha^{-1}
4	Fertilización química	Nitrógeno, fósforo y potasio.	120-40-40
5	Testigo	Sin aplicación.	N/A

Resultados

Los resultados mostraron diferencias estadísticas significativas ($p \leqslant 0.01$), exhibiendo comportamientos diferenciales en las diferentes dosis aplicadas al cultivo. La variación de los coeficientes mostró 11.49-17.5 %, esto para las variables de número de hojas y peso seco de la planta. Las diferencias estadísticas presentadas en la fuente de tratamientos se deben al diverso efecto mostrado por las variables evaluadas; esto fue ocasionado por las diferentes dosis de aplicación. En este sentido, se muestra que la aplicación de consorcios bacterianos y biorreguladores de crecimiento impacta de manera positiva en el desarrollo y crecimiento de las plántulas de arroz (*Oryza sativa* L.). Resultados similares se presentaron en una investigación sobre el potencial de inoculantes en la agricultura, la cual indicaba mejores rendimientos en cultivos biofertilizados y complementados con fuentes de nutrición química (Aguilar Carpio et al., 2022).

Los resultados del análisis de medias (Figura 1) muestran al tratamiento Bioeves conformado por *Azospirillum lipoferum*, *Rhizophagus irregularis*,

Figura 1. Respuesta del número de hojas al aplicar diferentes tratamientos en plántulas de arroz



Trichoderma spp. como el que presentó los valores más significativos en el número de hojas (nueve); mientras que las plántulas tratadas con Armoseed y Bioenraizer mostraron siete hojas; el tratamiento con fertilización química mostró cinco, siendo el de menor significancia que el testigo sin aplicación. Asimismo, el modo de acción producido por *Azospirillum lipoferum* realiza su actividad fijando nitrógeno atmosférico, produciendo fitohormonas (como auxinas), mejorando la arquitectura radicular y promoviendo el desarrollo foliar, lo que pudo ser un causal en el efecto de dicho tratamiento (González-Salas et al., 2021). Además, el efecto de las fitohormonas como las citoquininas estimulan la división celular y brotación lateral, su balance determina la organogénesis (Grageda-Cabrera et al., 2018), por lo que el efecto producido por el tratamiento de Bioenraizer fue mejor comparado con la fertilización química al permitir una mayor generación en el número de hojas.

En altura de la planta (Figura 2), se determinó que las dosis aplicadas tuvieron un efecto significativo además de diverso, siendo el tratamiento Armoseed, compuesto por *Azotobacter vinelandi*, *Rhizobium etli*, *Bacillus subtilis*, *Burkholderia vietnamensis*, *Trichoderma harzianum*, *Micromonospora echinospora*, el que propició mayor beneficio a la planta con relación a la altura (26.7 cm),

Figura 2. Impacto de los inoculantes y bioenraizadores en la altura de la planta



con un aumento en centímetros de 1.8; en contraste con la aplicación constituida por Bioenraizer; en todos los casos se superó al testigo sin aplicación. Lo anterior posiblemente se deba a la estimulación de las rizobacterias que promovieron un aumento significativo en el bioma del cultivo.

En la Figura 3, podemos observar que los tratamientos de Armoseed y Bioenraizer con 0.17 gramos en el peso seco superaron al tratamiento Bioeves que obtuvo 0.15 en el peso; cabe señalar que este tratamiento logró un incremento del 40 % en relación con el tratamiento de fertilización química (0.06 g), mientras que el testigo sin aplicación fue el de menor efecto con 0.03 g. Estos resultados concuerdan con una investigación sobre fertilización biológica-química, indicando el incremento en el peso seco de la planta con la inoculación de microorganismos (Aguilar Carpio et al., 2022).

En cuanto a la tasa absoluta de crecimiento (Figura 4), la aplicación de Armoseed generó mayor peso seco por día con 0.0033 g/día^{-1} respecto al testigo sin aplicación (0.006 g/día^{-1}). Lo anterior indica que la asociación conjunta de microorganismos, como *Azotobacter vinelandi*, *Rhizobium etli*, *Bacillus subtilis*, *Burkholderia vietnamensis*, *Trichoderma harzianum*, *Micromonospora echinospora*, logra un aumento positivo en la velocidad de crecimiento de las plántulas de

Figura 3. Generación de peso seco al aplicar tratamientos biológicos y químicos en *Oryza sativa* L.

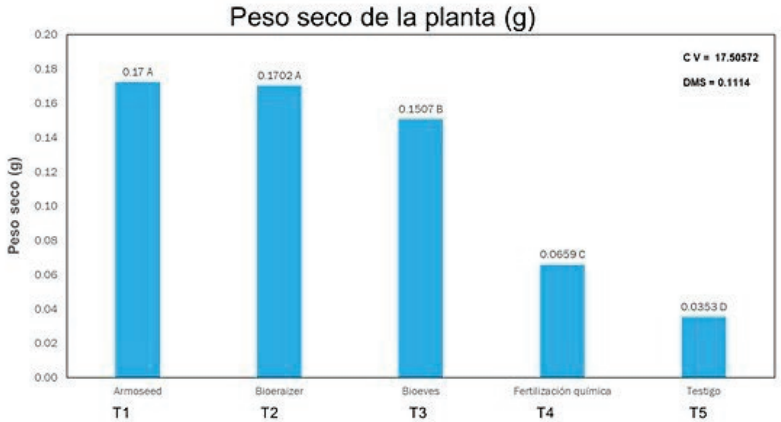
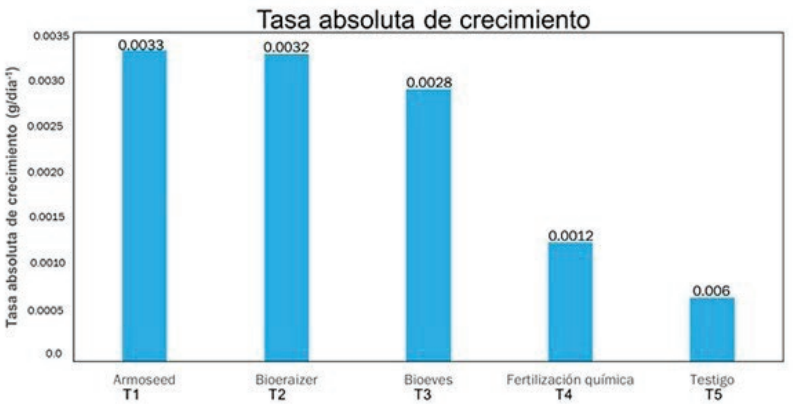


Figura 4. Efecto de los tratamientos sobre la tasa absoluta de crecimiento en plántulas de arroz



arroz. Lo anterior concuerda con diferentes investigaciones donde se han utilizado fertilizaciones biológicas con la finalidad de lograr respuestas positivas y significativas en crecimiento y desarrollo de diferentes cultivos (Fernandes Domingues Duarte et al., 2020).

Conclusiones

La biofertilización con el uso de microorganismos benéficos y fitohormonas causa un efecto significativo en etapas vegetativas de arroz. La utilización de fertilizantes biológicos constituidos por *Azotobacter vinelandi*, *Rhizobium etli*, *Bacillus subtilis*, *Burkholderia vietnamensis*, *Trichoderma harzianum*, *Micromonospora echinospora*, en combinación con ácido indol butírico, citoquininas, aminoácidos y húmicos, resulta ser una alternativa rentable de producción conveniente. Esta biofertilización puede utilizarse en combinación con la fertilización química, promoviendo un uso más racional de esta última. Por lo anterior, se recomienda administrar Armoseed y Bioenraizer en conjunto con la fertilización convencional para favorecer el desarrollo vegetativo en el cultivo de *Oryza sativa* L.

Agradecimientos

A la Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc.

Referencias

Aguilar Carpio, C., Arriaga Rubio, L. M., Cervantes Adame, Y. F., Arenas Julio, Y. R. y Escalante Estrada, J. A. S. (2022). Rentabilidad y producción del maíz vs-535 en respuesta a la fertilización química y biológica. *Acta Universitaria, 32*, 1-3. https://doi.org/10.15174/au.2022.3285

Canizalez-Silva, M., Blanco-Macías, F., España-Luna, M. P., de la Rosa-Rodríguez, R., Lara-Herrera, A. y Lozano-Gutiérrez, J. (2024). Microorganismos en la biofertilización del cultivo de maíz como complemento a la fertilización

química. *Ecosistemas Y Recursos Agropecuarios, 11*(1), 1-9. https://doi.org/10.19136/era.a11n1.3903

Cervantes Adame, Y. F., Mendoza Pérez, M. F., Aguilar Carpio, C., Torres Segundo, C., Bahena Delgado, G. y Tlatelpa Becerro, Á. (2024). Efectividad biológica y química en cultivo de *Mentha spicata* L. En Á. Tlatelpa Becerro y G. R. Carbajal Pérez (Eds.), *De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico* (pp. 9-13). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Fernandes Domingues Duarte, C., Cecato, U., Biserra, T. T., Mamédio, D. y Galbeiro, S. (2020). Azospirillum spp. en gramíneas y forrajeras. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 11*(1), 223-240. https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4951

González-Salas, U., Gallegos-Robles, M. Á., Preciado-Rangel, P., García-Carrillo, M., Rodríguez-Hernández, M. G., García-Hernández, J. L. y Guzmán-Silos, T. L. (2021). Effect of organic and inorganic sources of nutrition mixed with biofertilizers on melon fruit production and quality. *Revista Terra Latinoamericana, 39*, 1-10. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.904

Grageda-Cabrera, O. A., González-Figueroa S. S., Vera-Nuñez J. A., Aguirre-Medina, J. F. y Peña-Cabriales J. J. (2018). Efecto de los biofertilizantes sobre la asimilación de nitrógeno por el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9*(2), 281-289. https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1071

Ireta, P. A. del R. (2023). Arroz del estado de Morelos en México, acciones de posicionamiento en el mercado: Arroz del Estado de Morelos. *Acta Universitaria, 33*, 1-14. https://doi.org/10.15174/au.2023.3662

Ireta-Paredes, A. del R., Altamirano-Cárdenas J. R., Ayala-Garay, A. V., Covarrubias-Gutiérrez I. y Muñoz-Rodríguez M. (2017). Factores que explican la permanencia de la producción de arroz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 15*, 2981-2993. https://doi.org/10.29312/remexca.v0i15.420

Martínez Reyes, L., Aguilar Jiménez, C. E., Carcaño Montiel, M. G., Galdámez Galdámez, J., Morales Cabrera, J. A., Martínez Aguilar, F. B., Llaven Martínez, J. y Gómez Padilla, E. (2018). Biofertilización y fertilización

química en maíz (*Zea mays* l.) en Villaflores, Chiapas, México. *Siembra, 5* (1), 26-37. https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1425

Matamoros, Q. A., Mesén Sequeira, F. y Jiménez Alvarado, L. D. (2020). Efecto de fitohormonas y fertilizantes sobre el enraizamiento y crecimiento de mini-estaquillas de híbridos F1 de café (*Coffea arabica*). *Revista de Ciencias Ambientales, 54*(1), 58-75. https://doi.org/10.15359/rca.54-1.4

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Bioherbicida y herbicida: su efecto en el manejo de malezas y productividad en el cultivo de nopal verdura

Cid Aguilar Carpio,[a*] José Alberto Salvador Escalante Estrada,[a]
Yessica Flor Cervantes Adame,[b] Adriana Pérez Ramírez[c]

Abstract

The prickly pear cactus is cultivated and produced in many parts of Mexico, one of the most significant problems in the crop are the weeds. To control them, herbicides are used; however, these can cause problems such as residual effects and toxicity. An alternative is the use of plant extracts with allelopathic effects. Therefore, the objective of this study was to determine the effect of plant extracts on the weed population in prickly pear cactus crop. The study was conducted in Morelos, where the following treatments were applied: 1. Atrazine, 2. *Parthenium hysterophorus* extract, 3. *Helianthus annuus* extract, 4. *Argemone munita* extract, and a control without application. The variables evaluated were the percentage of weed control, yield, and profitability. The highest percentage of weed control, yield and profitability of the crop was achieved with the application of atrazine, followed by the application of *Helianthus annuus*, *Argemone munita* and *Parthenium hysterophorus*.

Keywords: productivity, cactus, bioherbicide.

[a] Posgrado de Botánica, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.
[b] Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, UAEM.
[c] UAEM.
[*] Autor de correspondencia: aguilar.cid@colpos.mx

Introducción

El nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) se encuentra distribuido y se produce en muchas partes del país, siendo Morelos uno de los principales estados productores con una producción de 409,285 t, seguido de la Ciudad de México con 185,045 t y Estado de México con 87,679 t (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2024).

En los últimos años, el aumento en el consumo del nopal verdura se debe a su alto contenido de fibra, vitamina C y agua, lo cual contribuye a mejorar los procesos digestivos, además de sus propiedades medicinales (Moran et al., 2013). El aumento en su consumo ha ganado relevancia en países como Francia, Japón, China, Canadá y algunas regiones de Sudáfrica. Por lo que, para su comercialización en mercado nacional e internacional, es importante la calidad del producto; dentro de las características de calidad, la inocuidad resalta debido a que se garantiza que los alimentos están libres de contaminantes químicos, dañinos para la salud humana (Maki-Díaz et al., 2015).

No obstante, dentro de las dificultades más significativos en la producción del nopal se encuentra el manejo de malezas, ya que afectan directamente al crecimiento de la planta objetivo, debido a la competencia por agua, luz y nutrimentos. Para su control, se emplean herbicidas, sin embargo, estos generan problemas de residualidad y toxicidad. Debido a estas consecuencias negativas, se han buscado opciones más amigables con el ambiente y menos dañinos a la salud humana (Verdeguer et al., 2020). Una alternativa es la implementación de extractos con origen vegetal que presenten sustancias aleloquímicas. Existen diversos estudios relacionados con el uso de extractos vegetales, donde se han observado que algunas plantas (*Helianthus annuus*, *Parthenium hysterophorus*, *Argemone ochroleuca*) producen sustancias alelopáticas que afectan a diferentes cultivos y malezas (Herrera-Lara et al., 2025).

Por consiguiente, el objetivo del experimento fue evaluar el efecto de diferentes bioherbicidas y herbicidas sobre las malezas y la productividad en plantas de nopal verdura.

Materiales y metodología

El estudio fue implementado a campo abierto en temporada de lluvias, en el municipio de Tlayacapan, Morelos, que se localiza a 18° 58'45.5" N y 98° 59'17.4" O, a una altitud de 1298 m. s. n. m. Los extractos vegetales fueron analizados en el Laboratorio de Biotecnología del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero.

Para la obtención de los extractos vegetales, se realizó la recolección de las especies de *Parthenium hysterophorus*, *Helianthus annuus* y *Argemone ochroleuca*, las cuales se encontraron en etapa de floración. En promedio se recolectaron 4 kg de materia seca de cada especie. Para los extractos de las plantas se utilizó etanol como solvente.

El cultivo que se utilizó en el experimento fue de nopal [*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller] cultivar Milpa Alta, el estudio se realizó en julio de 2024.

El experimento consistió en la aplicación de un herbicida comercial (atrazina), tres bioherbicidas (*Parthenium hysterophorus*, *Helianthus annuus* y *Argemone munita*) y un testigo sin tratamiento, en un suelo sin malezas (Tabla 1). Así, el diseño experimental que se estableció fue en bloques al azar con cinco tratamientos y en cuatro repeticiones. En cuanto al área de la unidad experimental, esta fue de tres surcos de 1.4 m × 4 m.

Las variables evaluadas fueron porcentaje de control de malezas, que se estimó de forma visual, con base en la densidad de población y luego, ajustado por el grado de daño con respecto al testigo, se les asignó un valor dentro de la escala de 0 % a 100 %, en donde 0 % significó que la maleza no fue afectada y 100 %, que fue completamente inhibida o destruida (Champion, 2000).

Los tratamientos fueron evaluados sobre las malezas predominantes, lo cual se efectuó a los 7, 14 y 21 días después de la aplicación (dda).

En madurez comerciable, se determinó el rendimiento del nopal (kg ha^{-1}) con ayuda de una balanza digital.

Las cifras de las variables evaluadas fueron sometidas a un análisis de varianza, seguido de la prueba de comparación de medias Tukey. Respecto al análisis estadístico, los datos fueron examinados con el programa Statistical Analysis System versión 9.0.

Tabla 1. Tratamientos de bioherbicidas y herbicidas aplicados en el cultivo de nopal

Tratamiento	Ingrediente activo	Dosis	
		L ha^{-1}	g i. a. L^{-1}
1	Atrazina	2	900
2	Parthenium hysterophorus	11	0.38 %
3	Helianthus annuus	11	0.38 %
4	Argemone munita	11	0.38 %
5	Testigo sin aplicación	-	-

I. a. = ingrediente activo.

Adicionalmente, se realizó un análisis económico para determinar la rentabilidad de cada tratamiento, tomando en cuenta el costo total (CT) y el ingreso total (IT), que servirán de base para determinar el ingreso neto (IN) y la ganancia por peso invertido (GPI) (Herrera-Lara et al., 2025).

Resultados

Respecto al porcentaje de control de las malezas evaluadas, se observó que la aplicación de atrazina generó un control del 98 %, desde los 7 dda y hasta los 14 dda, siendo el control más alto presentado en el estudio (Figura 1). En contraste, los bioherbicidas presentaron un control que fue desde los 78 % a 39 %, mostrando diferencias estadísticas respecto al testigo sin aplicación, lo que sugiere posiblemente un efecto inhibitorio de la germinación de las malezas. Al respecto, Herrera-Lara et al. (2025) y Aguilar Carpio et al. (2025) encontraron que con la aplicación de extractos de *P. hysterophorus* y *H. annuus* se registraron controles de 78 % y 74 % en diversas malezas en el cultivo de nopal.

En el rendimiento vegetal de nopal (Figura 2), se registraron diferencias estadísticas significativas por efecto de los tratamientos evaluados. El mayor rendimiento de nopal se obtuvo con atrazina, seguido de la aplicación de *P. hysterophorus*, *H. annuus* y *A. munita*, los cuales no mostrar diferencias

Figura 1. Efecto de diferentes bioherbicidas y herbicida sobre el control de especies de malezas

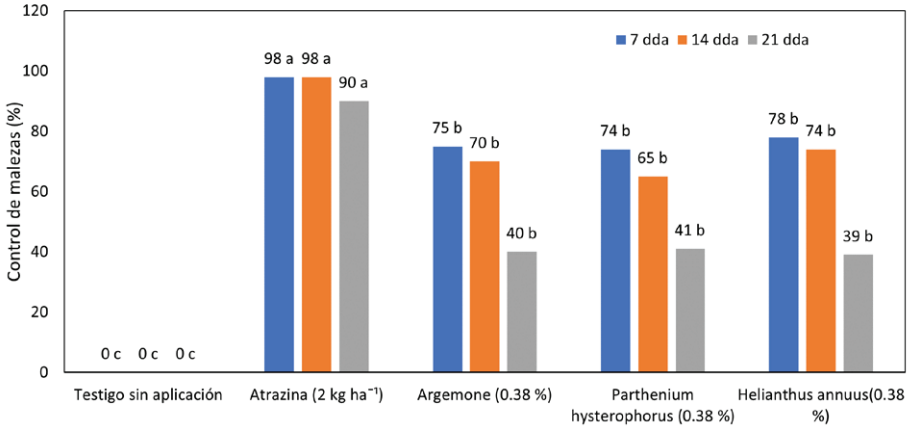
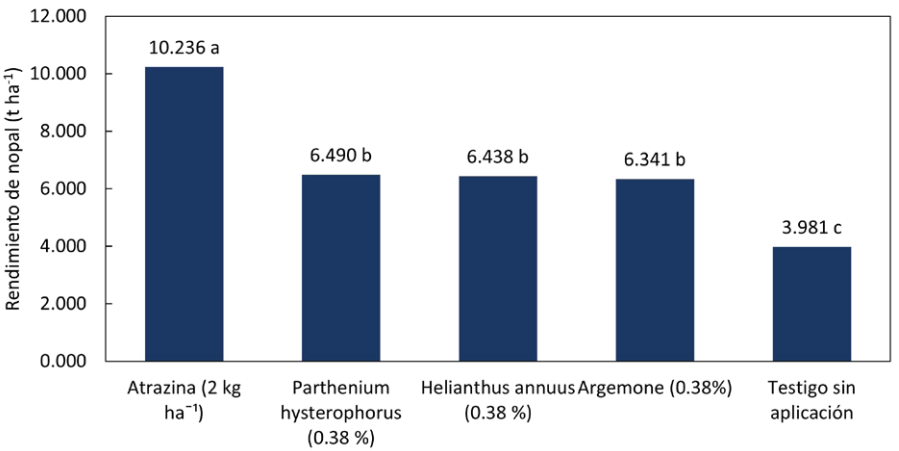


Figura 2. Efecto de bioherbicidas y herbicidas sobre el rendimiento de nopal



significativas entre sí, pero sí respecto al testigo sin aplicación, el cual presentó el rendimiento más bajo; esto posiblemente fue debió a la elevada densidad de población de malezas que afecto la producción del cultivo del nopal (Aguilar Carpio et al., 2025).

En relación con el análisis económico del cultivo por efecto del herbicida y bioherbicidas, se encontró que la aplicación de atrazina generó el mayor IN e IT, lo que se tradujo en una mejor GPI (Tabla 2). Tendencias que también fueron registradas por Aguilar Carpio et al. (2025), quienes observaron una mejor rentabilidad con la aplicación de herbicidas (diuron) con relación a extractos vegetales en el cultivo de nopal. Los bioherbicidas generaron un aumento en los costos totales de producción, lo que disminuyó el IN; sin embargo, se obtuvo una rentabilidad positiva en comparación al testigo sin aplicación.

Tabla 2. Efecto de la aplicación de bioherbicidas y herbicidas sobre la rentabilidad en la producción de nopal

Tratamientos	Costo Total	Ingreso Total	Ingreso Neto	GPI
		($)		
1. Atrazina (2 L ha^{-1})	16,485	81,888	65,403	3.97
4. *Parthenium hysterophorus* (0.38 %)	18,695	51,920	33,225	1.78
5. *Helianthus annuus* (0.38 %)	18,695	51,504	32,809	1.75
6. *Argemone munita* (0.38 %)	18,695	50,728	32,033	1.71
7. Testigo sin aplicación	16,145	32,768	17,123	1.09

Conclusiones

El más alto control de malezas, rendimiento y rentabilidad del cultivo se logró con la atrazina, seguido de la aplicación de *Helianthus annuus*, *Argemone munita* y *Parthenium hysterophorus*, los cuales fueron significativos respecto al testigo sin aplicación. Entre los bioherbicidas, se observó una respuesta similar en el

manejo de malezas, rendimiento y rentabilidad en la producción de nopal, siendo una alternativa positiva en el control de malezas.

Agradecimientos

Agradecimiento al Colegio de Postgraduados por el apoyo financiero proporcionado.

Referencias

Aguilar Carpio, C., Escalante Estrada, J. A. S., Pérez Ramírez, A., Herrera Lara, I. E. y Arenas Julio, Y. R. (2025, 12-14 de mayo). *Manejo biológico de malezas y su efecto en la producción del cultivo de nopal verdura*. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Agropecuaria, Celaya, Guanajuato, México. https://www.somecta.org.mx/wp-content/uploads/2025/09/Memoria-Somecta-2025.pdf

Champion, G. T. (2000). *Bright and the Field Scale Evaluations Herbicides Tolerant*. G M Trials.

Herrera-Lara, I. E., Aguilar-Carpio, C., Núñez-Aragón, P. N., Alcántara-Jiménez, J. A. y Escalante Estrada, J. A. S. (2025). Efecto de extractos vegetales y herbicidas sobre el manejo de malezas en el cultivo de nopal verdura. *Ciencias Agronómicas Aplicadas y Biotecnología, 5*(5), 135-141.

Maki-Díaz, G., Peña, C., García-Nava, R. y Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (Opuntia ficus-indica) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia, 49*(1), 31-42. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003&lng=es&tlng=es

Moran, L. J., Ko, H., Misso, M., Marsh, K., Noakes, M., Talbot, M., Frearson, M., Thondan, M., Stepto, N. y Teede, H. J. (2013). Dietary composition in the treatment of polycystic ovary syndrome: A systematic review to inform evidence-based guidelines. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 113*(4), 520-545. https://doi.org/10.1016/j.jand.2012.11.018

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Verdeguer, M., García, J. M. y García, M. (2020). La cosecha de agua de lluvia en la agricultura: una revisión de técnicas y aplicaciones. *Revista de Ingeniería Agrícola y Biosistemas, 12*(1), 1-15. https://doi.org/10.1016/j.ria.2020.01.001

Análisis de un diseño novedoso de la estructura del campo de flujo biointerdigitado para una batería de flujo redox orgánico mediante un modelo en 3D-CFD

Gustavo Aparicio Mauricio,[a*] Isidro J. González Panzo,[b] Martin R. Cruz Díaz[b]

Abstract

In this work, a novel flow field structure design in a redox flow battery (RFB) is presented, comprising a biomimetic configuration and an interdigitated structure, called bio-interdigitated. A 3D steady-state mathematical model based on the Nernst-Planck and Butler-Volmer theories was developed to compare the pressure drop obtained at different volumetric flow rates with the proposed and a conventional flow field, and also to visualize the concentration distribution of the ions contained in the electrolytes and the local current distribution at the electrodes and along the RFB channels by solving the models in COMSOL Multyphysics. This model was validated with experimental data for the organic system 2,6-dihydroxyanthraquinone/ferro-ferricyanide reported in the literature. The simulation results show a good prediction of the polarization curves at a "10 % state of charge".

Keywords: organic redox flow battery, biomimetic, flow field bio-interdigitated, model 3D-CFD.

[a] División de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

[b] Departamento de Ingeniería y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

[*] Autor de correspondencia: amauricio@tese.edu.mx

Introducción

En las baterías de flujo redox (BFR), un aspecto clave para facilitar la distribución de los electrolitos a través de los electrodos porosos es la configuración del campo de flujo que tiene un impacto en la transferencia de masa, en las reacciones electroquímicas y, como consecuencia, en la eficiencia de la celda. Por lo tanto, desde hace dos décadas existe un gran número de propuestas de diseño que fueron analizadas y reportadas en diversas publicaciones.

En particular, se ha reportado que el uso de campos de flujo en forma de serpentín o interdigitado en BFR puede mejorar el rendimiento en comparación con los campos de flujo en paralelo (Messaggi et al., 2018; Ishitobi et al., 2019). Ali et al. (2020) utilizaron un modelo numérico tridimensional para evaluar diversos campos de flujo basados en forma serpentín, revelando que un aumento en el número de canales de flujo redujo la mala distribución de los electrolitos y la resistencia al flujo, lo que resultó en una menor caída de presión y, al mismo tiempo, disminuyó la potencia de bombeo. Por otro lado, Li et al. (2020) evaluaron la caída de presión y las pérdidas de bombeo en una BFR con campo de flujo interdigitado mediante un modelo desarrollado en CFD, lo que reveló la influencia del espaciamiento de los canales interdigitados adyacentes sobre los caudales en los canales y en el rendimiento general de la BFR. A partir de los diseños de campo de flujo utilizados en celdas de combustibles con membranas de intercambio de protones, llamados bioinspirados, se han propuesto configuraciones novedosas del campo de flujo aplicados en BFR. Estos diseños están inspirados de la naturaleza; es decir, son configuraciones naturales para maximizar la distribución de algún fluido sin causar cambios drásticos en un organismo, por ejemplo: la distribución de nutrientes en las vainas de las hojas de las plantas o del oxígeno en un pulmón. En este sentido, en una revisión elaborada por Huang et al. (2022), los autores reportan al menos siete estudios acerca de diseños novedosos del campo de flujo para una BFR con el par redox de vanadio publicados desde el año 2017. A pesar de que la mayoría de estos estudios propone diseños de campo de flujo para BFR con un área del electrodo menor de 200 cm^2, a excepción del estudio reportado por Gundlapalli y Jayanti (2021), estos diseños alcanzan caídas

de presión en el rango de 0.1-25 kPa, como se especifica en la Tabla 1. Sin embargo, Yang et al. (2024), desarrollaron un diseño novedoso del campo de flujo para una BFR con vanadio, llamado biomimético, mediante un modelo multifísico en 3D, este diseño fue comparado con un campo de flujo en forma de serpentín. Los resultados muestran que el diseño biomimético reduce sustancialmente la caída de presión, especialmente a flujos volumétricos altos, por ejemplo, a 180 mL/min, la caída de presión se redujo hasta a un "40 %" en comparación con el campo de flujo serpentín. Además, Huang et al. (2025), analizaron el efecto de añadir obstrucciones en el canal principal de un diseño de campo de flujo basado en las venas foliares biónicas de una hoja, buscando aprovechar el efecto de desviación para mejorar sustancialmente la uniformidad de la distribución del electrolito y la capacidad de transferencia de masa. En ambos estudios mencionados arriba, la caída de presión solo se redujo a la mitad del obtenido con el campo de flujo en forma de serpentín. Estos valores conducen al incremento de la energía demandada por las bombas que son utilizadas para circular el fluido desde los tanques de almacenamiento hasta la celda, aumentando los costos del sistema.

Tabla 1. Comparación de diferentes propuestas de campo de flujo para BFR

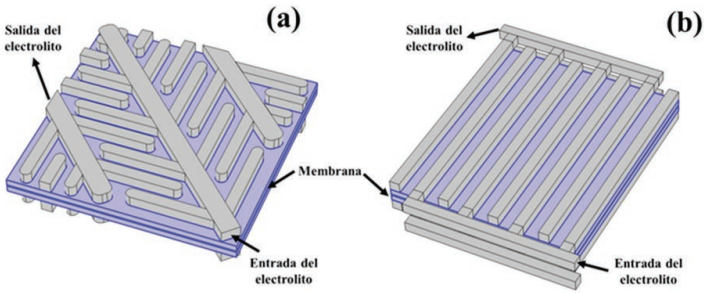
	Campo de flujo	Área (cm^2)	Flujo ($mL\ min^{-1}$)	Presión (kPa)
Yue et al. (2018)	Abierto en forma trapezoidal	156	300-1500	8-24
Zeng et al. (2019)	Interdigitado jerárquico	40	40-200	2-10
Akuzu et al. (2019)	Interdigitado con obstrucciones	10	4-80	5-25
Xu et al. (2020)	Serpentín rotatorio	100	120-900	0.1-1
Gundlapalli et al. (2021)	Serpentín dividido en secciones	900-2200	100-770	2.5-17
Yang et al. (2024)	Biomimético en forma de hoja	10	30-180	0.5-3
Huang et al. (2025)	Biomimético en forma de hoja con obstrucciones	4	60-180	1.8-2.7

Por lo tanto, la propuesta de un diseño innovador de la estructura del campo de trayectoria de un fluido a través de una celda de flujo es el objetivo de este trabajo. Este campo de flujo llamado biointerdigitado, es el resultado de la combinación de dos configuraciones. La primera está basada en la forma de una hoja, donde se considera la distribución de los nutrientes por diversas ramificaciones a través de una vaina principal hacia otras más pequeñas, y la segunda configuración es la interdigitada, que es utilizada para el intercambio con el electrodo poroso. Posteriormente, mediante un modelo 3D en estado estacionario, se analizó la función de este diseño en una BFR para el sistema alcalino orgánico 2,6 dihidroxiantraquinona/ferrocianuro, donde se observa el efecto de la distribución del fluido a través de los canales y los electrodos porosos en la transferencia de masa, las reacciones electroquímicas y la distribución de corriente y potencial. Los resultados teóricos se validaron con los resultados experimentales reportados por Lin et al. (2015) y se compararon con un campo de flujo interdigitado con un área de electrodo de 4 cm^2.

Materiales y metodología

El modelo fue desarrollado para una BFR con campo de flujo biointerdigitado en 3D y con un área de 4 cm^2. El dominio de simulación considera una estructura que está compuesta por dos tipos de canales: primarios y secundarios, manteniendo una configuración de 1:1.5:1. Además de los canales, el dominio considera los electrodos porosos (positivo y negativo) y una membrana de intercambio catiónico situada entre los electrodos con un área activa. Los electrolitos negativos y positivos se suministran a la celda desde los canales primarios con un ángulo de 45° y un ancho de 1.4 mm; posteriormente, el fluido se distribuye por los canales secundarios; que están distribuidos de forma interdigitada con un ángulo de 90° y un ancho de 1 mm el medio de intercambio entre los canales de entrada y salida son los electrodos porosos, como se muestra en la Figura 1a. En la Figura 1b, se muestra el dominio de un campo de flujo interdigitado con las mismas dimensiones de los canales y el electrodo utilizados en el campo de flujo propuesto. Los pares de electrolitos negativos y positivos son 2,6 DHAQ/ 2,6 DHAQ

Figura 1. Esquema del dominio de simulación en COMSOL de la geometría de las dos configuraciones del campo de flujo en la BFR: a) biointerdigitado y b) interdigitado



reducido y Ferro/Ferricianuro, respectivamente. La distribución de los electrolitos a través de los canales y en cada uno de los electrodos es considerada por la ecuación de Navier Stokes para la fase fluida, la ecuación de Brinkman para la fase pseudohomeogena fluido-sólido y la ecuación de continuidad. El transporte de los iones en los canales se evalúa a partir de la ecuación de Nernst-Planck. En los electrodos porosos, la distribución de concentración de cada especie (c_i) se calcula mediante la ecuación de Nernst-Planck con parámetros efectivos. El modelo hidrodinámico se acopla al modelo de transporte de masa para describir la concentración de los iones en los canales y los electrodos. Para describir las reacciones electroquímicas que se llevan a cabo en la superficie de los electrodos, se utiliza la ecuación de Butler-Volmer que depende de las concentraciones superficiales de las especies químicas *i*, c_{is} y las concentraciones iniciales de las especies químicas *i*, c_{i0} y está basada en las siguientes reacciones electroquímicas, ecuaciones 1 y 2:

$$Positivo: Fe\left(CN\right)_6^{4-} \rightleftarrows Fe\left(CN\right)_6^{3-} + e^- E_1^0 = 0.516 vsSHE \quad \text{Ec. 1}$$

$$Negativo: DHAQ^{2-} + 2e^- \rightleftarrows DHAHQ^{4-} E_2^0 = -0.684 vsSHE \quad \text{Ec. 2}$$

Por lo tanto, la densidad de corriente de transferencia de carga local por unidad de volumen en el electrodo negativo considerando el efecto del transporte de masa en la capa límite entre el *bulk* del electrolito y la superficie de carbón poroso mediante un coeficiente de transferencia de masa en la interfaz electrodo-electrolito, es decir, $j_{R,neg}$, se define como:

$$j_{R,neg} = \frac{Fk_{neg}\left(c_{DHAQ2-}\right)^{1-\alpha_{neg}}\left(c_{DHAHQ4-}\right)^{\alpha_{neg}}\left(\frac{c_{DHAHQ4-}}{c^{0}_{DHAHQ4-}}e^{(1-\alpha_{neg})nF\eta_{neg}/RT}-\frac{c_{DHAQ2-}}{c^{0}_{DHAQ2-}}e^{-\alpha_{neg}nF\eta_{neg}/RT}\right)}{1+Fk_{neg}\left(c_{DHAQ2-}\right)^{1-\alpha_{neg}}\left(c_{DHAHQ4-}\right)^{\alpha_{neg}}\left(\frac{e^{(1-\alpha_{neg})nF\eta_{neg}/RT}}{Fk_{m,neg}c^{0}_{DHAHQ4-}}+\frac{e^{-\alpha_{neg}nF\eta_{neg}/RT}}{Fk_{m,neg}c^{0}_{DHAQ2-}}\right)} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde k_{neg} es la constante de velocidad de reacción para el electrodo negativo, η_{neg} es el sobrepotencial del electrodo para el lado negativo, α_{neg} es el coeficiente de transferencia de carga negativo; n es el número de electrones transferidos en la reacción, para electrodo negativo (n=2), $km_{,neg}$ es el coeficiente local de transferencia de masa para el electrodo negativo, que cuantifica qué tan rápido se mueve una especie química en la película límite hacia la superficie del electrodo. El sobrepotencial de activación en la Ecuación 3 se calculó de la siguiente forma: $\eta_{neg} = \phi_s - \phi_l - E_{eq,neg}$, donde ϕ_s y ϕ_l son los potenciales del electrodo poroso sólido y del electrolito dentro del electrodo, respectivamente; $E_{eq,neg}$ es el potencial de circuito abierto, que se evaluó utilizando la ecuación de Nernst. De manera similar, se plantea una ecuación para la densidad de corriente de transferencia de carga local por unidad de volumen en el electrodo positivo. El conjunto de ecuaciones que conforman el modelo matemático fue resuelto con el método de elemento finito utilizando el *software* COMSOL Multhyphysics 6.2®, empleando 80,100 elementos.

Resultados

La Figura 2 muestra las curvas de polarización obtenidas con COMSOL Multiphysics 6.2® (líneas continuas) a un estado de carga (SOC) de 10 % para ambas configuraciones, así como los datos experimentales reportados por Lin et

Figura 2. Comparación del voltaje experimental y la simulación para ambas configuraciones con respecto a la densidad de corriente

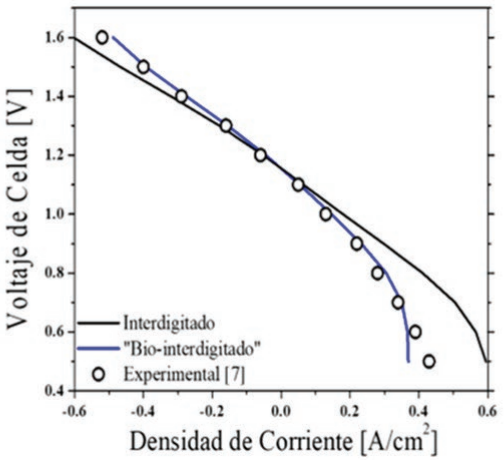
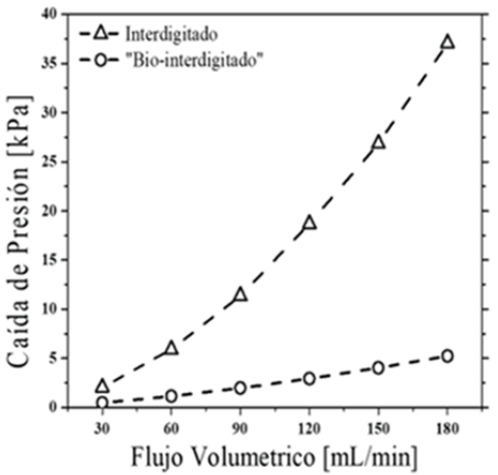


Figura 3. Comparación de la caída de presión obtenida con COMSOL entre el campo de flujo interdigitado y el biointerdigitado



al. (2015) (símbolos) a un flujo de 60 mL min-1, donde se puede observar que las predicciones obtenidas con el campo de flujo biointerdigitado coinciden en mayor medida con los datos experimentales para el proceso de descarga, en comparación con el resultado obtenido con el campo de flujo interdigitado.

Por otro lado, el efecto del flujo volumétrico sobre la caída de presión en la BFR en ambas configuraciones se muestra en la Figura 3. Es notable la disminución de la caída de presión en la BFR con campo de flujo biointerdigitado con respecto al campo de flujo interdigitado. Por ejemplo, a un flujo de 180 mL/min el aumento de la caída de presión es casi diez veces en la BFR con el campo de flujo convencional, lo que indica una buena distribución de los electrolitos a través de los canales y en los electrodos en el campo de flujo biointerdigitado. Estos resultados, se asemejan a los obtenidos con las configuraciones del campo de flujo propuestas por Huang et al. (2025) y Yang et al. (2024).

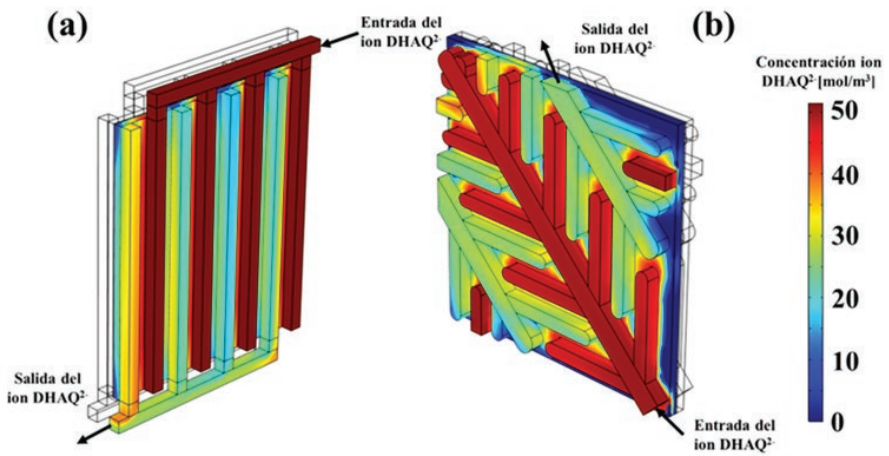
La distribución espacial de la concentración del ion 2,6 $DHAQ^{2-}$ en el canal poroso y el electrodo negativo para ambas configuraciones se muestra en la Figura 4. En general, en la Figura 4b se puede observar claramente que con el campo de flujo biointerdigitado se presenta una mayor uniformidad de la concentración del ion 2,6 $DHAQ^{2-}$ en el área del electrodo negativo y en los canales de entrada y salida, que parte desde el canal central y se extiende hacia las esquinas opuestas. En cambio, con el campo de flujo interdigitado la distribución de la concentración del ion 2,6 $DHAQ^{2}$ está canalizada hacia una sola dirección, como se observa en la Figura 4a.

Conclusiones

La caída de presión en el diseño propuesto con campo de flujo bioinspirado fue mucho menor a las obtenidas con los diseños convencionales, por ejemplo, a un flujo volumétrico de 180 mL/min el valor de la caída de presión fue hasta siete veces menor que el obtenido con el campo de flujo interdigitado Sin embargo, en comparación con otros diseños biomiméticos reportados en la literatura, la caída de presión obtenida con el campo de flujo propuesto es ligeramente superior, posiblemente por el espesor del electrodo considerado; es decir, para realizar

una adecuada comparación se deben mantener las dimensiones de los canales y el electrodo poroso, además de las propiedades físicas del fluido. Basado en las teorías de Nernst-Planck y Butler-Volmer, se desarrolló un modelo en 3D en CFD para describir el comportamiento del fluido, la distribución de concentración de los iones y la distribución de corriente y potencial para una BFR alcalina orgánica a nivel laboratorio con un campo de flujo biointerdigitado. Los resultados confirman la validez del modelo mediante la predicción de los datos experimentales reportados por Lin et al. (2015) y además este modelo se puede utilizar para analizar otras configuraciones.

Figura 4. Distribución espacial de la concentración molar del ion 2,6 DHAQ2- en la BFR alcalina orgánica en dos configuraciones: a) Interdigitado y b) Biointerdigitado



Referencias

Ali, E., Kwon, H., Kim, J. y Park, H. (2020). Numerical study on serpentine design flow channel configurations for vanadium redox flow batteries, *Journal of Energy Storage, 32*, 101802. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101802

Gundlapalli, R. y Jayanti, S. (2021). Effective splitting of serpentine flow field for applications in large-scale flow batteries, *Journal of Power Sources, 487*, 229409. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229409

Huang, Z., Liu, Y., Xie, X., Wu, J., Deng, Y., Xiong, Z., Wu, L., Li, Z., Huang, Q., Liu, Y., Luo, Y. y Zhang, C. (2025). Design and optimization of a novel flow field structure to improve the comprehensive performance of vanadium redox flow batteries. *Journal of Power Sources, 640*, 236736. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.236736

Huang, Z., Mu, A., Wu, L. y Wang, H. (2022). Vanadium redox flow batteries: Flow field design and flow rate optimization. *Journal of Energy Storage, 45*, 103526. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103526

Ishitobi, H., Saito, J., Sugawara, S., Oba, K. y Nakagawa, N. (2019). Visualized cell characteristics by a two-dimensional model of vanadium redox flow battery with interdigitated channel and thin active electrode. *Electrochimica Acta, 313*, 513-522. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.04.055

Li, F., Wei, Y., Tan, P., Zeng, Y. y Yuan, Y. (2020). Numerical investigations of effects of the interdigitated channel spacing on overall performance of vanadium redox flow batteries. *Journal of Energy Storage, 32*, 101781. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101781

Lin, K., Chen, Q., Gerhardt, M., Tong, L., Kim, S., Eisenach, L., Valle, A., Hardee, D., Gordon, R., Aziz, M. y Marshak, M. (2015). Alkaline quinone flow battery. *Science, 349*(6255), 1529-1532. https://doi.org/10.1126/science.aab3033

Messaggi, M., Canzi, P., Mereu, R., Baricci, A., Inzoli, F., Casalegno A. y Zago, M. (2018). Analysis of flow field design on vanadium redox flow battery performance: Development of 3D computational fluid dynamic model

and experimental validation. *Applied Energy, 228*, 1057-1070. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.148

Yang, B., Mu, A., Wang, J., Wang, Y. y Wang, W. (2024). Bioinspired Flow Fields: A numerical investigation into Nature-Mimicking designs for boosting vanadium redox flow batteries. *Chemical Engineering Science, 298*, 120440. https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120440

Design of a three-fingered underactuated robotic gripper with two joint movements

Francisco Ortega Zamora,[a*] Luis Govinda García Valdovinos,[b] Francisco David Pérez Reynoso[b]

Abstract

Abstract. In this paper the design of a three-fingered gripper driven by six servo-actuators is presented. Each finger is capable of flexion and extension—via an underactuated mechanism—as well as abduction and adduction. The kinematics of the finger unit are analyzed, and the forward kinematic equations are presented, with these, the range of motion of the fingers, as well as the contact volume of the gripper are shown. The circuit diagram and visual evidence of the gripper are also exhibited.

Keywords: robotic gripper, underactuated mechanism, linkage-driven fingers, servo-actuators.

Introduction

One of the most common *types* of devices in the field of robotics are end effectors. Depending on the tasks that the robotic system will be performing, these can have different characteristics; some may be simple parallel grippers, some may be multi-fingered, have rigid or soft geometries, or be part of several other classifications (Cairnes et al., 2023). One *type* of design that has been proven to be highly versatile is the three-fingered anthropomimetic grippers, which

[a] Interinstitutional Science and Technology Program, Center for Engineering and Industrial Development.

[b] National Laboratory for Digital Technology Research, Center for Engineering and Industrial Development.

[*] Corresponding author: f.ortega@posgrado.cidesi.edu.mx

have been used in various activities inside and outside of the structured environments of lab testing (Khatib et al., 2016; Spenko et al., 2018). Several designs of this *type* of gripper have been published or are commercially available, such as fully actuated (Yumbla et al., 2025), underactuated (Backus & Dollar, 2016; Koustoumpardis et al., 2014; Telegenov et al., 2014), and reconfigurable designs (Odhner et al., 2014; Townsend, 2000). One gripper design that stands out is the 3-Finger Adaptive Gripper by Robotiq, its main characteristic is that both co-planar fingers can perform abduction and adduction. This particular gripper has been studied and used as a test bed for a Proportional-Integral-Derivative (PID) force control scheme (Sadun et al., 2016b; Sadun et al., 2016a).

A major drawback of commercially available devices is the cost, which can be a prohibiting factor; this is why there has also been an emphasis on developing "open source" (Yumbla et al., 2025) or "low cost" (Telegenov et al., 2015) grippers. Following this line of research, and considering that no such gripper designs in which all fingers can perform the joint movements of flexion/extension and abduction/adduction have been published, in this chapter, such a gripper is proposed.

Materials and methods

Kinematic analysis

For the flexion and extension of each finger, a single linear actuator was used. The finger unit was designed as a linkage driven mechanism with two phalanges, thus making it underactuated. The mechanism consists of a six-bar linkage, as shown in Figure 1, which can be analyzed as a three-bar linkage, coupled to a four-bar linkage, following the nomenclature in Table 1 and considering the following articular coordinates:

- Linear actuator stroke extension $ext = [0,30]mm$
- Servomotor angular position $\theta = [0,90]°$

Figure 1. Six-bar linkage finger mechanism side (left) and front (right) views. Links and corresponding angles. Force sensors: flexion (orange diamond), adduction (purple diamond)

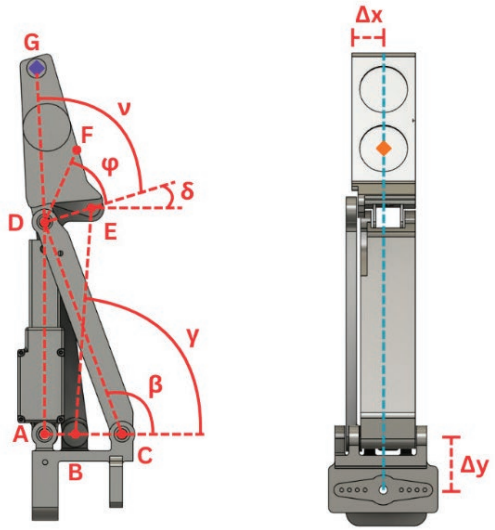


Table 1. Six-bar linkage, nomenclature and size of each link

Link	Angle	Length	Nomenclature
AC	-	30.00 mm	a_1
AD	-	82.00 + ext mm	a_2
CD	β	87.78 mm	a_3
BC	-	18.41 mm	a_4
BE	γ	87.78 mm	a_5
DE	δ	18.22 mm	a_6

The three-bar linkage consists of the a_1, a_2 and a_3 links, considering the given articular coordinate *ext*, via the law of cosines, β is given by Equation 1:

$$\beta = \pi - \left(\frac{a_1^2 + a_3^2 - a_2^2}{2a_1 a_3} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

The four-bar linkage is comprised of the a_3, a_4, a_5 and a_6 links. By following Freudenstein's method for analytically solving four-bar mechanisms as presented on (Mata et al., 2016), and defining the following terms as shown in Equations 2 to 7:

$$k_1 = \frac{a_4}{a_3} \quad \text{Eq. 2}$$

$$k_2 = \frac{a_4}{a_5} \quad \text{Eq. 3}$$

$$k_3 = \frac{a_4^2 + a_3^2 + a_5^2 - a_6^2}{-2a_3 a_5} \quad \text{Eq. 4}$$

$$A = k_3 - k_2 coscos\,\beta - k_1 - coscos\,\beta \quad \text{Eq. 5}$$

$$B = 2\ sin\ sin\,\beta \quad \text{Eq. 6}$$

$$C = k_3 - k_2 cos\ cos\,\beta + k_1 + coscos\,\beta \quad \text{Eq. 7}$$

With these expressions, the solution of the four-bar linkage can be obtained by Equations 8 and 9:

$$\gamma = 2\left(-B + \sqrt{B^2 - 4AC}, 2A\right) \quad \text{Eq. 8}$$

$$\delta = \left(\frac{a_4 + a_3 coscos\,\beta - a_5 coscos\,\gamma}{a_6}\right) \quad \text{Eq. 9}$$

To account for the change of sign in *cos cos*(δ) when δ=0, it is necessary to find the critical value with respect to the articular coordinate. This may be accomplished by once again utilizing Freudenstein's method to solve the mechanism with the desired constraints, leading to Equation 10:

$$ext_{crit} = 4.63\,mm \quad \text{Eq. 10}$$

With the knowledge of the angles between the links of the mechanism, the kinematic equations of the finger can be obtained. The flexion and adduction force sensors are located at different positions relative to the finger mechanism; these differences will be accounted for by the terms shown in Table 2.

With these, the kinematic equations for the flexion FSR sensor are shown in Equations 11, 12 and 13:

$$x = \left(\Delta y + a_3 sin\ sin\,\beta - a_7\ sin\ sin\left(\left(ext - ext_{crit}\right)\delta + \phi\right)\right) cos\ cos\,\theta \quad \text{Eq. 11}$$

$$y = \left(\Delta y + a_3 sin\ sin\,\beta - a_7\ sin\ sin\left(\left(ext - ext_{crit}\right)\delta + \phi\right)\right) sin\ sin\,\theta \quad \text{Eq. 12}$$

$$z = a_3 cos\ cos\ \beta - a_7 cos\ cos\left(\left(ext - ext_{crit}\right)\delta + \phi\right) \quad \text{Eq. 13}$$

Table 2. Additional terms for kinematic analysis

Segment	Angle	Magnitude	Nomenclature
DF	-	31.07 mm	a_7
DG	-	60.37 mm	a_8
-	DE∠DF	49.58°=0.86 rad	φ
-	DE∠DG	74.41°=1.29 rad	v
-	-	12.21 mm	Δx
-	-	6.99 mm	Δy

And the kinematic equations for the adduction FSR sensors are presented in Equations 14, 15 and 16:

$$x = \left(\Delta y + a_3 sin\ sin\ \beta - a_8\ sin\ sin\left(\left(ext - ext_{crit}\right)\delta + v\right)\right) cos\ cos\ \theta - \Delta x\ sin\ sin\ \theta \quad \text{Eq. 14}$$

$$y = \left(\Delta y + a_3 sin\ sin\ \beta - a_8\ sin\ sin\left(\left(ext - ext_{crit}\right)\delta + v\right)\right) sin\ sin\ \theta + \Delta x\ cos\ cos\ \theta \quad \text{Eq. 15}$$

$$z = a_3 cos\ cos\ \beta - a_8 cos\ cos\left(\left(ext - ext_{crit}\right)\delta + v\right) \quad \text{Eq. 16}$$

Electronics

The electronic architecture of the gripper is based around an ESP32 microcontroller; this is due to the fact that real-time control benefits from a high clock

speed. A "shield" board was used as the embedded relays allow for independent power supply of different modules and motors.

There are multiple analog voltage signals that must be monitored continuously, such as those from the force sensors or the position of the actuators. To guarantee a high enough number of inputs and improve precision, dedicated ADC modules were utilized. In order to control the linear actuators, a PWM signal with an amplitude of 5 V is needed (Actuonix *Motion* Devices, 2019), and for the servomotors it is strongly recommended, thus a servo controller board was used. Both the ADCs and servo control board interface with the microcontroller via a single I^2C bus.

The servomotors were modified to provide position feedback, jumper wires were soldered to the wipers of the potentiometers in the embedded position control circuits, and voltage followers were then used on these signals to avoid loading the circuits. Regarding the position feedback of the linear actuators, the datasheet (Actuonix *Motion* Devices, 2019) specifies a signal range from 0-3 V, although, it often exceeds 4 V and it may damage other components. Hence, trim potentiometers were used as voltage dividers to reduce the amplitude of this signal. To avoid loading the actuator's feedback circuit with the potentiometers, voltage followers were also used; all of this is shown in the circuit diagram (Figure 2).

Fabrication

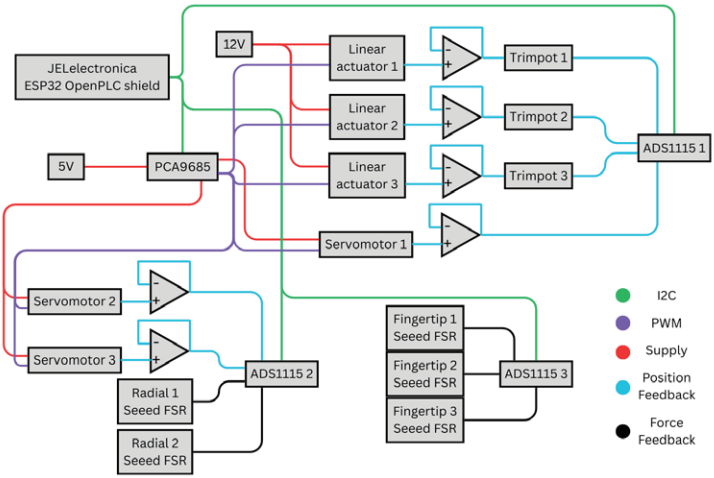
The gripper was designed using Autodesk's Fusion360 *software* and it was 3-D printed in PLA+ filament using a Bambu Lab A1 printer.

Results

Contact volume

With the set of kinematic Equations 14, 15 and 16, and limiting the abduction and adduction range to ±15°—as 30° is the average of the active range of

Figure 2. The gripper's circuit diagram



motion for the abduction of the metacarpophalangeal joints (Erdogan & Bakirci, 2023)—we arrive at an approximation of the contact volume of the fingers of the gripper, as shown in Figure 3. The kinematic model was programmed in Python, and the *graphics* were generated using the Matplotlib library.

PCB

According to the circuit diagram presented in Figure 2, a PCB was designed using the EasyEDA software. Additional space and routing were added to facilitate the implementation of a fourth ADC module should it be needed for future research. This PCB can be seen mounted on the bottom half of the gripper base in Figure 4.

Assembly

As mentioned previously, the mechanism and the base of the gripper were 3D printed. The individual components were assembled using MR63ZZ and 608-2ZZ ball-bearings; 3M 8 mm and 30 mm dowel pins; and 2M, 3M, and 4M screws and

Figure 3. Contact volume of the fingers of the gripper, top side (a) and isometric (b) views

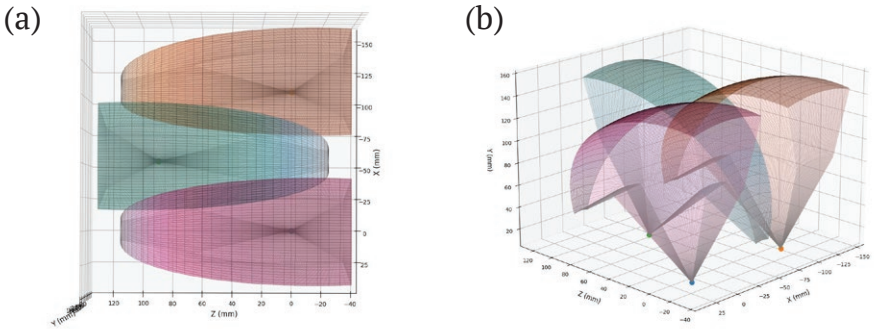
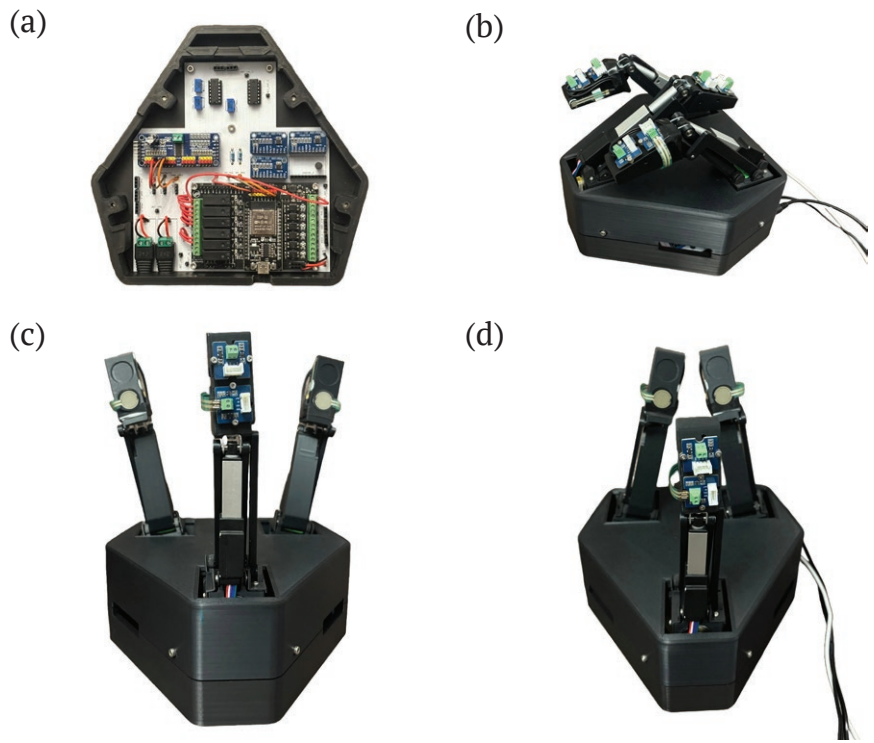


Figure 4. Proposed three-fingered gripper. PCB (a), all finger flexion (b), co-planar fingers abduction (c) and co-planar fingers adduction (d)



heat inserts. Specialized pins were machined at the Center for Engineering and Industrial Development; this was because the mounting brackets of the linear actuators are not of a standard size (Actuonix *Motion* Devices, 2019). The assembled gripper is shown performing various articular movements in Figure 4.

Conclusions

The results presented in this paper show the validity of the proposed mechanical and electronic designs for a three-fingered underactuated gripper, in which each finger incorporates two joint movements. The derived kinematic equations describe accurately the capabilities of the finger mechanism, as evidenced by the strong correlation between the simulated contact volume and the experimentally observed behavior.

Additionally, the adequate functionality of the electronic circuit design and the manufactured PCB validates the proposed electronic architecture.

We believe that the proposed gripper could be of use as a basis for future investigations focused on manipulation control tasks or interaction control.

Acknowledgments

The first author gratefully acknowledges the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación for its funding of their postgraduate studies during this research.

References

Actuonix Motion Devices. (2019). *Miniature Linear Motion Series L12. Actuonix Product Datasheets and 3D Files*. https://www.actuonix.com/assets/images/datasheets/ActuonixL12Datasheet.pdf

Backus, S. B., & Dollar, A. M. (2016). An adaptive three-fingered prismatic gripper with passive rotational joints. *IEEE Robotics and Automation Letters, 1*(2), 668-675. https://doi.org/10.1109/LRA.2016.2516506

Cairnes, T. J., Ford, C. J., Psomopoulou, E., & Lepora, N. (2023). An overview of robotic grippers. *IEEE Potentials, 42*(3), 17-23. https://doi.org/10.1109/MPOT.2023.3236143

Erdogan, K., & Bakirci, S. (2023). Evaluation of the abduction angles between hand fingers. *Medicine Science: International Medical Journal, 12*(1), 211-216. https://doi.org/10.5455/medscience.2022.12.267

Khatib, O., Yeh, X., Brantner, G., Soe, B., Kim, B., & Ganguly, S. (2016). Ocean one: a robotic avatar for oceanic discovery. *IEEE Robotics & Automation Magazine, 23*(4), 20-29. https://doi.org/10.1109/MRA.2016.2613281

Koustoumpardis, P. N. and Nastos, K. X., & Aspragathos, N. A. (2014, September 3-5). Underactuated 3-finger robotic gripper for grasping fabrics. *23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*, Smolenice, Slovakia. https://doi.org/10.1109/RAAD.2014.7002271

Mata, A. S., Bataller Torras, A., Cabrera Carrillo, J. A., Ezquerro Juanco, F., Guerra Fernández, A. J., Nadal Martínez, F., & Ortiz Fernández, A. (2016). *Fundamentals of Machine Theory and Mechanisms*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31970-4

Odhner, L. U., Jentoft, L. P., Claffee, M. R., Corson, N., Tenzer, Y., Ma, R. R., Buehler, M., Kohout, R., Howe, R. D., & Dollar, A. M. (2014). A compliant, underactuated hand for robust manipulation. *The International Journal of Robotics Research, 33*(5), 736-752. https://doi.org/10.1177/0278364913514466

Sadun, A. S., Jalani, J., & Jamil, F. (2016, September 25-27). Grasping analysis for a 3-Finger Adaptive Robot Gripper. *2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*, Ipoh, Malaysia. https://doi.org/10.1109/ROMA.2016.7847806

Sadun, A. S., Jalani, J., Abdul Sukor, J., & Jamil, F. (2016, September 25-27). Force control for a 3-finger adaptive robot gripper by using PID controller. *2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA)*, Ipoh, Malaysia. https://doi.org/10.1109/ROMA.2016.7847807

Spenko, M., Buerger, S., & Iagnemma, K. (Eds.). (2018). *The DARPA Robotics Challenge Finals: Humanoid Robots to the Rescue*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74666-1

Telegenov, K., Tlegenov, Y., & Shintemirov, A. (2014, November 27-29). An underactuated adaptive 3D printed robotic gripper. *10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on Mecatronics (MECATRONICS2014-Tokyo)*, Tokyo, Japan. https://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2014.7018563

Telegenov, K., Tlegenov, Y., & Shintemirov, A. (2015). A Low-Cost Open-Source 3-D-Printed Three-Finger Gripper Platform for Research and Educational Purposes. *IEEE Access, 3*, 638-647. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2433937

Townsend, W. (2000). The BarrettHand grasper - programmably flexible part handling and assembly. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 27*(3), 181-188. https://doi.org/10.1108/01439910010371597

Yumbla, F., Quinones Yumbla, E., Mendoza, E., Lara, C., Pagalo, J., Terán, E., Algabri, R., Doh, M., Luong, T., & Moon, H. (2025). An Open-Source 3D Printed Three-Fingered Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping. *Biomimetics, 10*(1), 26. https://doi.org/10.3390/biomimetics10010026

Obtención de la tenacidad a la fractura del acero SAE 1045

Rita Aguilar Osorio,[a*] Alfredo Maciel Cerda,[b]
Erick Omar Barrera Parangueo[c]

Abstract

Fracture toughness (K_{IC}) is an important material property for predicting and preventing fractures, as well as for assessing damage tolerance. Because fracture is the primary cause of material failure, determining K_{IC} is crucial for analyzing and predicting material performance. This paper presents the fracture toughness evaluation of SAE 1045 steel. This was obtained by performing Charpy impact tests and using the Priest-Charnock-Stewart correlation. Five V-notch specimens were fabricated for the tests. The absorbed energy was 19.22 Joules. Using this value and applying the Priest-Charnock-Stewart correlation, the fracture toughness was evaluated. The K_{IC} value obtained was 60.94 MPa$\sqrt{m}$. This value is one of the fundamental parameters for analyzing the linear elastic fracture mechanics to establish safety levels during the operation of mechanical components and structures.

Keywords: Fracture toughness, Charpy impact test, energy absorption, Priest-Charnock-Stewart correlation.

Introducción

Uno de los parámetros fundamentales para analizar el comportamiento de la propagación de las grietas en componentes mecánicos, es la tenacidad a la

[a] Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Zacatenco.
[b] Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM.
[c] Instituto Politécnico Nacional, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Zacatenco.
[*] Autor de correspondencia: raguilaro@ipn.mx

fractura. La tenacidad a la fractura (Dowling, 2013; Anderson, 2005; Suresh, 1998; Perez, 2004; Corona Cid, 2018; Howard y Medlin, 2000; Siewer et al., 2000) es una propiedad de los materiales que mide la resistencia a la propagación de las grietas en componentes mecánicos que operan bajo cargas cíclicas. Esta propiedad es de gran relevancia en el análisis de la mecánica de la fractura debido a que se utiliza como un criterio de fractura en función del factor de intensidad de esfuerzos. Este criterio establece que la propagación de grieta será estable cuando el factor de intensidad de esfuerzos sea menor a la tenacidad a la fractura, mientras que cuando el factor de intensidad de esfuerzos sea igual o mayor a la tenacidad a la fractura la grieta se propagará de forma inestable y sobrevendrá la fractura total del componente mecánico (Dowling, 2013; Anderson, 2005; Suresh, 1998; Corona Cid, 2018; Howard y Medlin, 2000). Por lo cual, la importancia de la tenacidad a la fractura en el diseño mecánico es relevante en la predicción de las grietas, la seguridad y la confiabilidad de la operación de los componentes mecánicos.

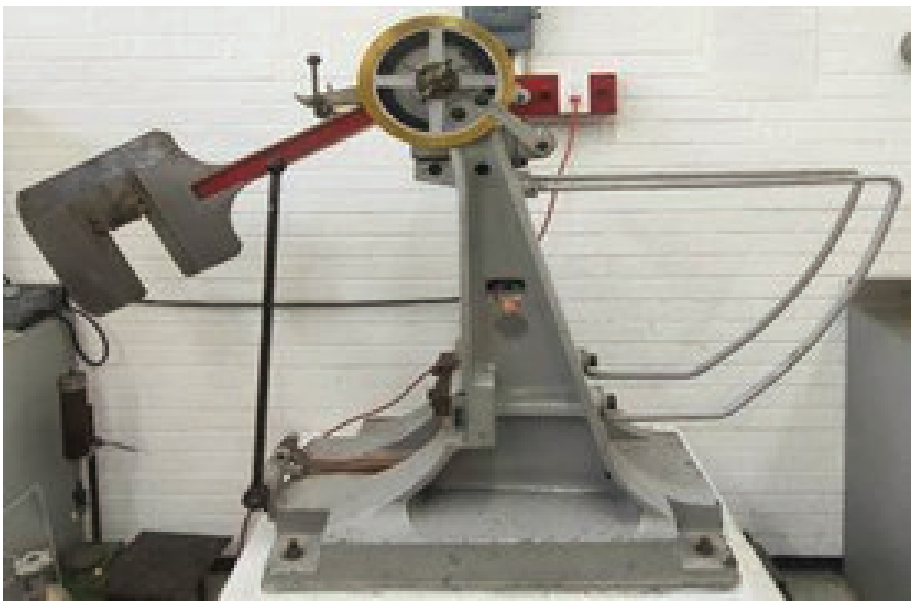
Existen diferentes métodos y ensayos para determinar la tenacidad a la fractura de un material, incluyendo el método de microindentaciones Vickers (Howard y Medlin, 2000; Siewer et al., 2000; NDT Machine, 2023), el método de Hall-Petch (Howard y Medlin, 2000; NDT Machine, 2023; ASTM International, 2016; Jones, 1973; Rossoll et al., 2002; Hertzberg, 1996), el ensayo de tensión (Howard y Medlin, 2000; Siewer et al., 2000; NDT Machine, 2023; ASTM International, 2016; Jones, 1973; Rossoll et al., 2002; Hertzberg, 1996, Cain et al., 2016) y el ensayo de impacto Charpy (Howard y Medlin, 2000; NDT Machine, 2023; ASTM International, 2016; Jones, 1973; Rossoll et al., 2002; Hertzberg, 1996). Algunos de estos métodos son complejos. En la industria, se requieren métodos de ensayos rápidos y confiables. Los más utilizados son el ensayo de tensión y el de impacto Charpy.

El objetivo de este artículo es describir el procedimiento para obtener la tenacidad a fractura del acero SAE 1045, realizando ensayos de impacto Charpy y aplicando la correlación Priest-Charnock-Stewart.

Metodología para realizar los ensayos de impacto Charpy

Para esta investigación se realizaron ensayos de impacto Charpy, debido a que es una técnica sencilla en comparación con el método de tensión. Siendo el margen de error entre este ensayo y el método de tensión de ± 5 % (Howard y Medlin, 2000; ASTM International, 2016; Cain et al., 2016; Doong et al., 1986; Francois, 2010). La finalidad de realizar estos ensayos fue determinar la tenacidad a la fractura del acero SAE 1045, utilizando la máquina o péndulo de impacto Charpy SHIMADZU® que se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Máquina de impacto Charpy (Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México)

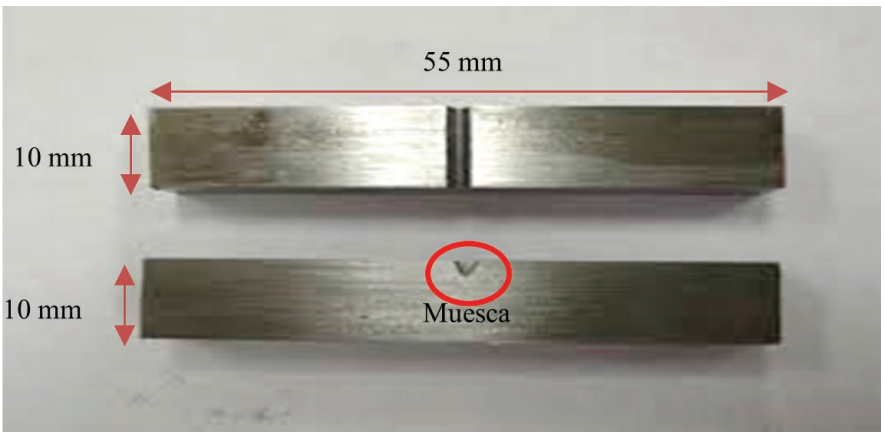


Fabricación de los especímenes

Para realizar los ensayos de impacto Charpy se fabricaron cinco especímenes con acero SAE 1045. El cual es un acero de alta resistencia, excelente maquinabilidad

y alta tenacidad. Se puede utilizar para fabricar ejes, flechas, pasadores, engranes, espárragos y componentes en general que requieran de alta resistencia, es ampliamente utilizado en la industria metalmecánica. Los especímenes se diseñaron con base en la norma ASTM E-23 (ASTM International, 2016). La longitud de los especímenes fue de 55 mm y la sección transversal fue de 10 mm x 10 mm. La principal característica de estos especímenes es la muesca central en V, con un ángulo de 45°, una profundidad de 2 mm y un radio de curvatura de 0.25 mm en la punta de la muesca. En la Figura 2 se muestra uno de los especímenes fabricados.

Figura 2. Espécimen fabricado con acero SAE 1045



Condiciones experimentales

Las condiciones para los ensayos de impacto fueron ambientales y de operación. La temperatura fue de 21°C y la humedad de 38.3 %. Para las condiciones de operación se consideró la energía inicial, E_0, del péndulo, la cual se determinó con la siguiente expresión (Howard y Medlin, 2000; ASTM International, 2016):

$$E_0 = m_m g h_0 \qquad \text{Ec. 1}$$

Siendo m_m: la masa del martillo en el extremo del péndulo, g: la constante de la gravedad y h_0, la altura inicial del péndulo. Para determinar el ángulo inicial del péndulo, se utilizó la siguiente expresión:

$$h_0 = L\left(1 - cos\alpha\right) \quad \text{Ec. 2}$$

Siendo L: la longitud del péndulo y α: el ángulo inicial del péndulo. Despejando α de la Ecuación 2 se obtiene:

$$\alpha = arccos\ arccos\left(1 - \frac{h_0}{L}\right) \quad \text{Ec. 3}$$

La velocidad de impacto, V, se calculó con la siguiente expresión:

$$V = \sqrt{2g} \quad \text{Ec. 4}$$

Los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriores se muestran en la Tabla 1, los cuales se consideraron como condiciones iniciales para el desarrollo de los ensayos de impacto Charpy.

Tabla 1. Condiciones iniciales para realizar los ensayos

Energía inicial del péndulo E_0	Altura inicial del péndulo h_0	Ángulo inicial del péndulo α	Velocidad de impacto V
347.42 J	1.36 m	145.47	5.16 m/s

Procedimiento experimental

Para el desarrollo de los ensayos, primero se verificó que el equipo no tuviera ningún daño que afectara su funcionamiento. Después se levantó el péndulo hasta la altura máxima con un ángulo de 145.47, siendo éste el inicial. Para calibrar el equipo se liberó el sistema de accionamiento del péndulo y se dejó oscilar tres ciclos completos. Se registró la lectura final calibrada del goniómetro. Posteriormente se levantó el péndulo hasta la altura máxima.

El espécimen se colocó sobre los soportes del equipo de manera que el martillo impactará sobre la cara opuesta a la muesca maquinada. Se liberó el sistema de accionamiento del péndulo para que el martillo impactara al espécimen. Posteriormente, se registró la posición final en grados del péndulo. Finalmente, se detuvo el péndulo con el sistema de frenado y se recopilaron las partes del espécimen fracturado. Este procedimiento se repitió para las cinco probetas fabricadas. Con los valores registrados del ángulo final del péndulo después del impacto, se determinó la altura final del péndulo de la siguiente manera (Howard y Medlin, 2000; ASTM International, 2016).

$$h_1 = L\left(1 - cos\theta\right) \qquad \text{Ec. 5}$$

Siendo θ: el ángulo final del péndulo. Con el valor de h_1 se calculó la energía final E_1 del péndulo, utilizando la siguiente ecuación:

$$E_1 = m_m g h_1 \qquad \text{Ec. 6}$$

Para determinar la energía absorbida por el material E_{abs}, se calculó la diferencia entre la energía inicial y la energía final de la siguiente manera:

$$E_{ab} = E_o - E_1 \qquad \text{Ec. 7}$$

Para determinar el porcentaje de error de los resultados obtenidos de la energía absorbida por el material, se calculó la desviación estándar, *S*, y el coeficiente de variación, *Cv*, como se muestra a continuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \underline{x}\right)^2}{n-1}} \qquad \text{Ec. 8}$$

$$Cv = \frac{S}{\left|\underline{x}\right|} x100 \qquad \text{Ec. 9}$$

Siendo x_i: el valor de la energía absorbida por cada espécimen, $\underline{x}$: el valor promedio de la energía absorbida y *n*: el número de datos.

Con el valor de la energía absorbida por el material y utilizando la correlación de Priest-Charnock-Stewart (Howard y Medlin, 2000; ASTM International, 2016) se obtuvo la tenacidad a la fractura del material.

$$K_{IC} = \sqrt{\left(0.65 * E_{abs} * \sigma_{fl}\right) - 0.00637 * (\sigma_{fl})^2} \qquad \text{Ec. 10}$$

Siendo σ_{fl}: el esfuerzo de fluencia del acero SAE 1045.

Resultados

Para determinar la tenacidad a la fractura del material SAE 1045 se utilizó la correlación (Ec. 10) de Priest-Charnock-Stewart, considerando la cantidad de energía absorbida y el esfuerzo de fluencia del acero SAE 1045.

Para obtener la energía absorbida por el acero SAE 1045, se realizaron los ensayos de impacto, de la cuales se obtuvieron las posiciones finales del péndulo. Con estos valores se calcularon las energías finales del péndulo utilizando las

Ecuaciones 5 y 6. En la Tabla 2, se muestran los resultados de las energías finales y el valor promedio.

Tabla 2. Posición y energía final del péndulo

Ensayos	Ángulo final, θ	Altura final, h_1	Energía final, E_1
1	136.8	1.29 m	331.32 J
2	135.3	1.28 m	327.99 J
3	134.8	1.27 m	326.71 J
4	135.2	1.28 m	327.74 J
5	135.0	1.28 m	327.23 J
Promedio	135.4	1.28 m	328.19 J

Con el valor de la energía inicial y la energía final en el péndulo, se estimó la energía absorbida por el acero, utilizando la Ecuación 7. En la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3. Energía absorbida

Ensayos	Energía absorbida, E_{abs}
1	16.1 J
2	19.43 J
3	20.71 J
4	19.68 J
5	20.19 J
Promedio	19.22 J

Con los resultados obtenidos de la energía absorbida, se calculó la desviación estándar y el coeficiente de variación utilizando las Ecuaciones 8 y 9, respectivamente. Los resultados del análisis estadístico se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis estadístico de la energía absorbida

Parámetro	Desviación estándar	Coeficiente de variación
E_{abs}	0.625	3.25 %

De los resultados de la Tabla 4, se observa que el margen de error es solamente del 3.25 %; por lo tanto, los resultados obtenidos de la energía absorbida por el acero SAE 1045 son confiables y se pueden utilizar para obtener la tenacidad a la fractura del acero SAE 1045. Con el valor promedio de la energía absorbida y el esfuerzo de fluencia de 366.20 MPa del acero SAE 1045 obtenido experimentalmente por Mandon Gelvis I. (2024), se determinó la tenacidad a la fractura del acero, K_IC, utilizando la correlación de Priest-Charnock-Stewart [Ecuación 10]. En la Tabla 5 se muestra el valor de la tenacidad a la fractura.

El valor obtenido de la tenacidad a la fractura mostrado en la Tabla 5 se ajus-

Tabla 5. Valor de la tenacidad a la fractura

Correlación	K_{IC}
Priest-Char-Nock-Stewart	63.98 MPa√m

tó a un -5 %, debido al porcentaje de error entre el ensayo Charpy y el método de tensión. Por lo tanto, el valor corregido de la tenacidad a la fractura del acero SAE 1045 se muestra en la Tabla 6.

El valor de la tenacidad a la fractura de 60.94 MPa√m se utilizará para el

Tabla 6. Valor corregido de la tenacidad a la fractura del acero SAE 1045

Tenacidad a la fractura calculada	Margen de corrección	Tenacidad a la fractura corregida
63.98 MPa√m	-5 %	60.94 MPa√m

análisis de la propagación de las grietas. Como se mencionó anteriormente, este valor es fundamental para aplicar el criterio de fractura siguiente:

- Propagación de la grieta estable Si $K_I \leqslant K_C$
- Propagación de la grieta inestable Si $K_I \geqslant K_C$

Este criterio establece que cuando el valor del factor de intensidad de esfuerzos, K_I, se aproxime o sea igual al valor de la tenacidad a la fractura del material, K_{IC}, se considera como el límite estable de la propagación de la grieta. A partir de ese límite, la propagación de la grieta será inestable y el material se fracturará totalmente en cualquier instante.

Conclusiones

Para la obtención de la tenacidad a la fractura del acero SAE 1045, se realizaron ensayos de impacto Charpy. De estos ensayos se obtuvo la cantidad de energía absorbida por el acero, la cual fue de 19.22 Joules. Con este valor y la correlación de Priest-charnock-Stewart, se determinó la tenacidad a la fractura de 63.98 MPa√m. A este valor se le redujo el 5 %, el cual es el porcentaje de error entre el ensayo de Charpy y el ensayo de tensión, siendo este último el más preciso. Por lo tanto, el valor de la tenacidad a la fractura fue de 60.94 MPa√m.

La tenacidad a la fractura en el diseño mecánico es un valor relevante en la predicción de las grietas, la seguridad, la confiabilidad y la operación de los componentes mecánicos

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación (proyecto con registro SIP: 20240134) y al Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Referencias

Anderson, T. L. (2005). *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*. Taylor & Francis.

ASTM International. (2016). *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials (ASTM E23)*. ASTM International.

Cain, V., Thijs, L., Van Humbeeck, J., Van Hooreweder, B. y Knutsen, R. (2016). Crack propagation and fracture toughness of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 68-76. https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.12.006

Corona Cid R. (2018). *Determinación del factor de intensidad de esfuerzos crítico durante la propagación de las grietas para obtener un criterio de retiro de la pieza de maza de rueda portadora de los vagones del STC Metro de la Ciudad de México* [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico Nacional, México.

Doong, J. L., Hwang, J. R. y Chen, H. S. (1986). The influence of pearlitic fraction on fracture toughness and fatigue crack growth in nodular cast iron. *Journal of Materials Science, 21*, 871-878. https://doi.org/10.1007/BF01117367

Dowling, N. E. (2013). *Mechanical Behavior of Materials*. Pearson

Francois, D. (Ed.). (2010). *Structural Components: Mechanical Test and Behavioral Laws*. John Wiley & Sons.

Hertzberg, R. W. (1996). *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials* (4.ª ed.). John Wiley & Sons.

Howard, K. y Medlin, D. (2000). ASM Handbook. *Mechanical Testing and Evaluation: Vol. 8*. ASM International. https://doi.org/10.31399/asm.hb.v08.9781627081764

Jones, R. E. (1973). Tensile, fracture toughness and crack growth properties of a roll-extruded HP 9Ni-4Co-25C steel alloy. *Engineering Fracture Mechanics, 5*(1), 107-117. https://doi.org/10.1016/0013-7944(73)90011-8

Mandan Gelvis, I. (2024). *Estimación de la velocidad de la propagación de las grietas en el material SAE 1045 aplicando la Ley de París* [Tesis de maestría inédita]. Instituto Politécnico Nacional.

NDT Machine. (2023). *NDT (Non-Destructive Testing): A Complete Guide*. https://ndtmachine.com/non-destructive-testing/

Perez, N. (2004). *Fracture Mechanics*. Kluwer Academic Publishers.

Rossoll, A., Berdin, C. y Prioul, C. (2002). Determination of the fracture toughness of a low alloy steel by instrumented charpy impact test. *International Journal of Fracture, 115*, 205-226.

Schubert, W. D., Neumeister, H., Kinger, G. y Lux, B. (1998). Hardness to toughness relationship of fine-grained WC-Co hard metals. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 16*(2), 133-142. https://doi.org/10.1016/S0263-4368(98)00028-6

Siewer, T. A., Manahan, M. P., McCowan, C. N. y Holt, J. M. (2000). *The History and Importance of Impact Testing*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP14384S

Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials*. Cambridge University Press.

Diseño de resonador acústico fabricado mediante impresión 3D para moldeo por inyección

Edwin Francisco Pérez Rosete,[a] Samuel Portillo Contreras,[a*] Kevin Santana Ávila,[a] Adrián Tapia Rivera[a]

Abstract

This study presents the design, numerical simulation, and experimental validation of a two-plate injection mold fabricated using fused deposition modeling 3D printing technology. The main objective was to evaluate the feasibility of Rapid Tooling using polylactic acid for the production of an acoustic resonator in an academic setting. The methodology integrated Computer-Aided Design and Computer-Aided Engineering to analyze the rheological behavior of the polymer under three injection configurations. Simulation results identified an optimal configuration that minimized filling pressure (32.5 MPa) and cycle time (6.20 s), ensuring the structural integrity of the polymer mold. The functionality of the final component was validated through frequency analysis using the Phyphox app, demonstrating that additive manufacturing is an effective, low-cost strategy for validating industrial designs and studying complex physical phenomena.

Keywords: injection molding, 3D printing, mold simulation, polylactic acid, acoustic resonator.

[a] Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.

[*] Autor de correspondencia: samuel.portillo@uaem.mx

Introducción

La industria del plástico utiliza ampliamente el moldeo por inyección debido a su capacidad para fabricar piezas con geometrías complejas, alta precisión dimensional y buena repetibilidad en procesos productivos (Groover, 2020). Este método consiste en introducir un polímero termoplástico en estado fundido dentro de una cavidad, donde las condiciones de operación influyen directamente en la calidad y desempeño del producto obtenido.

En aplicaciones relacionadas con el diseño acústico, los resonadores requieren configuraciones geométricas específicas que permitan controlar adecuadamente los fenómenos de resonancia y mejorar la fidelidad sonora (Braga, s. f.; Puertas, s. f.). Desde la antigüedad, distintos estudios han analizado el uso de cavidades resonantes en construcciones arquitectónicas con el propósito de modificar o mejorar el comportamiento acústico de los espacios (Godman, 2007; Zakinthinos y Skarlatos, 2006).

La fabricación convencional de moldes de inyección suele realizarse mediante procesos de mecanizado sobre materiales metálicos, lo que implica costos elevados y tiempos de producción considerables. Frente a estas limitaciones, la manufactura aditiva, particularmente mediante *rapid tooling* (RT), se ha convertido en una alternativa atractiva para el desarrollo de moldes destinados a prototipos, series cortas y aplicaciones académicas (Rosochowski y Matuszak, 2000; Levy et al., 2003).

Entre los materiales utilizados en este tipo de procesos, destaca el ácido poliláctico (PLA), debido a su bajo costo y facilidad de fabricación mediante impresión 3D. Sin embargo, este polímero presenta restricciones relacionadas con su comportamiento térmico y resistencia mecánica (Hinczewski et al., 1998; Campanelli et al., 2014). Para reducir estos inconvenientes, las herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAE) permiten predecir el comportamiento del material y optimizar parámetros antes de la fabricación física (Dimla et al., 2005).

Por otra parte, la validación experimental puede realizarse mediante herramientas tecnológicas accesibles, como la aplicación Phyphox, la cual aprovecha

sensores integrados en dispositivos móviles para analizar fenómenos acústicos con precisión adecuada y bajo costo experimental (Staacks et al., 2018).

Este trabajo propone un enfoque integral que vincula el diseño asistido por computadora CAD, la simulación reológica y la manufactura aditiva para la creación de un resonador acústico. El objetivo central es diseñar y analizar un molde de inyección de dos placas fabricado en PLA, evaluando su desempeño en las etapas críticas de llenado y distribución de presión. A través de un análisis comparativo de tres configuraciones del punto de inyección, se busca optimizar la calidad de la pieza final y extender la vida útil del molde impreso, validando estrategias de fabricación de bajo costo para entornos de investigación y aprendizaje.

Materiales y metodología

Los materiales y herramientas empleados en la investigación fueron:

- Software de diseño asistido por computadora: SolidWorks.
- Instrumento de medición: vernier digital de precisión.
- Sistema de reproducción acústica: sistema de reproducción acústica (bocinas comerciales).
- Equipo de manufactura: impresora 3D de tecnología de modelado por deposición fundida (FDM).
- Material de fabricación: filamento PLA.

Diseño y modelado geométrico

El componente central del estudio consiste en un resonador acústico de geometría hueca, diseñado bajo principios de acústica física para optimizar la respuesta en frecuencia en cavidades cerradas. El modelado tridimensional se realizó mediante un *software* CAD, lo que permitió definir con precisión las tolerancias dimensionales y la partición del molde en un sistema de dos placas. El diseño del molde integró elementos críticos, como el canal de alimentación, los sistemas de venteo y la ubicación estratégica de los puntos de inyección con el fin

de asegurar un llenado homogéneo de la cavidad. En la Figura 1 se muestra el diseño para el resonador con las características descritas.

Caracterización del material

Para la fabricación del molde y el análisis reológico, se seleccionó PLA de grado comercial. Este polímero termoplástico fue elegido por su baja contracción térmica, su facilidad de procesamiento mediante manufactura aditiva y su viabilidad en entornos de prototipado rápido. Las propiedades termofísicas del PLA, tales como la temperatura de transición vítrea, el índice de fluidez (MFI) y la conductividad térmica, fueron configuradas en el entorno de simulación para modelar con precisión el comportamiento del material durante la transición de estado de fundido a sólido. La Figura 2 muestra el mallado utilizado para determinar la ubicación del punto de inyección óptimo.

Simulación numérica y análisis

El análisis del proceso de inyección se llevó a cabo mediante CAE, utilizando un *software* de simulación reológica especializado. El estudio se centró en evaluar tres configuraciones distintas de los puntos de inyección (compuertas), con el objetivo de identificar la distribución óptima de presiones y minimizar la formación de líneas de soldadura o atrapamientos de aire. Los parámetros operativos simulados incluyeron:

- Tiempo de llenado: evaluación de la velocidad de avance del frente de flujo.
- Distribución de presión: análisis de la presión máxima requerida para el llenado completo de la cavidad.
- Perfil térmico: estudio de la eficiencia del enfriamiento para prevenir deformaciones residuales en el molde fabricado por FDM.anufactura aditiva (*rapid tooling*).

La producción del molde físico se realizó mediante la tecnología FDM. Se emplearon parámetros de impresión optimizados, como una altura de capa de 0.2 mm y una densidad de relleno del 100 % en zonas críticas, con el fin de garantizar la integridad estructural del herramental frente a las presiones de inyección. Esta técnica de rapid tooling permitió reducir significativamente los tiempos de fabricación en comparación con los métodos de mecanizado convencionales.

Validación experimental y acústica

La funcionalidad del resonador fabricado se validó mediante pruebas de respuesta acústica. Para ello, se utilizaron sensores piezoeléctricos y la aplicación móvil Phyphox (Staacks et al., 2018), con el propósito de capturar y analizar los fenómenos de resonancia en tiempo real. Este enfoque permitió correlacionar el diseño teórico, basado en estudios históricos de cavidades resonantes, con los resultados experimentales obtenidos del prototipo inyectado.

Figura 1: Diseño de la pieza en SolidWorks

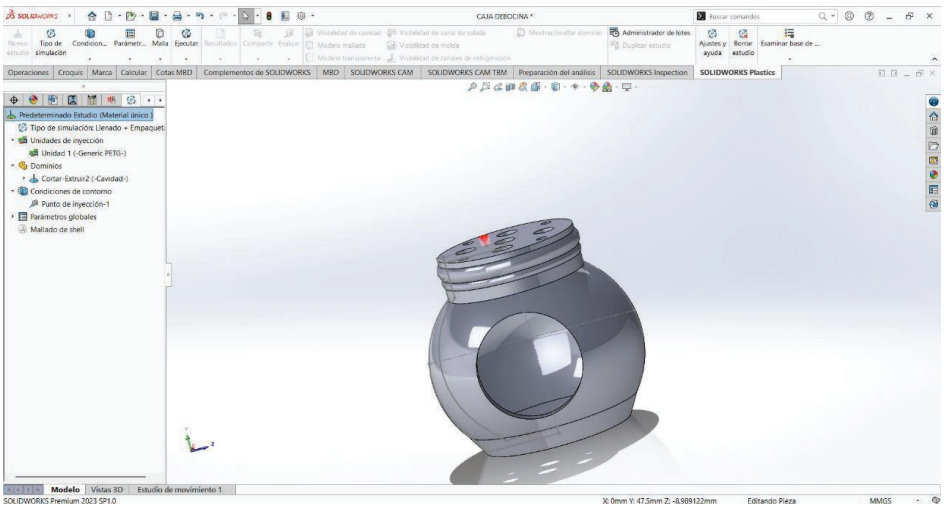
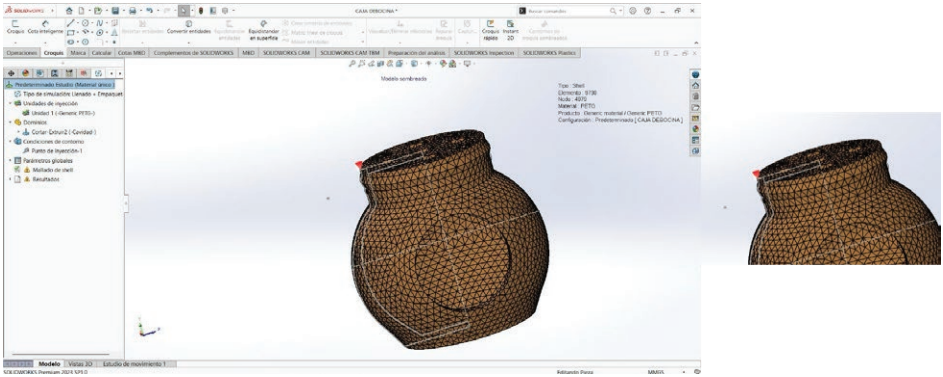


Figura 2. Ubicación de punto de inyección del molde



Resultados

Análisis de llenado y distribución de presiones

Los resultados de la simulación numérica permitieron evaluar el comportamiento reológico del polímero dentro de la cavidad del molde fabricado mediante manufactura aditiva. Se analizaron tres configuraciones de puntos de inyección, cuyos parámetros se resumen en la Tabla 1.

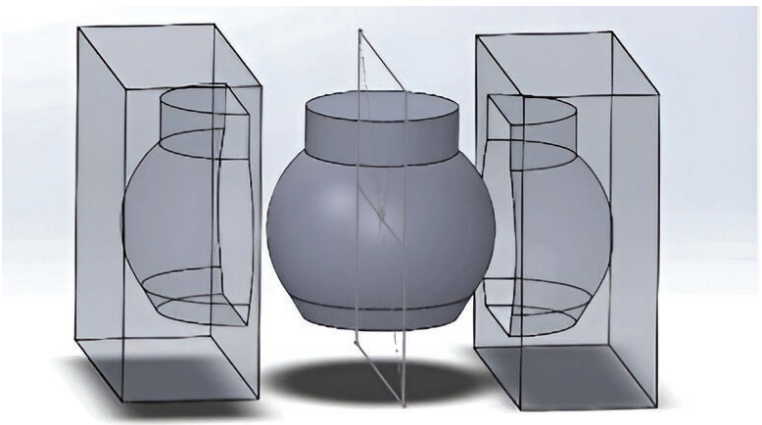
- Configuración 1 (superior): presentó un llenado completo en 6.68 s, con una presión máxima de 36.8 MPa. Este comportamiento indica un flujo estable, adecuado para geometrías esféricas.
- Configuración 2 (lateral): registró la presión más elevada del estudio (43.8 MPa), lo que incrementa los esfuerzos mecánicos sobre las paredes de PLA del molde. Aunque el llenado fue exitoso, este aumento de presión podría comprometer la integridad estructural del herramental impreso en 3D tras múltiples ciclos.
- Configuración 3 (central): se identificó como la configuración óptima, ya que logró el llenado en el menor tiempo (6.20 s) y con la presión mínima requerida (32.5 MPa).

La reducción de la presión en la Configuración 3 es fundamental para el RT, ya que permite operar dentro de los límites de resistencia mecánica de los moldes poliméricos, optimizando la calidad de la pieza final y reduciendo el desgaste del herramental. El diseño final del molde y la pieza se presenta en la Figura 3.

Tabla 1. Parámetros de simulación para las configuraciones analizadas

Parámetro	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
Material	PLA	PLA	PLA
Ubicación del punto de inyección	Superior	Lateral	Central
Tiempo de llenado (s)	6.68	6.90	6.20
Presión máxima (MPa)	36.8	43.8	32.5
Tipo de mallado	Shell	Shell	Shell
Análisis realizados	Llenado, presión, enfriamiento	Llenado, presión, enfriamiento	Llenado, presión, enfriamiento

Figura 3. Pieza ya terminada, con su molde



Comportamiento térmico y ciclos de enfriamiento

El análisis térmico reveló una de las limitaciones críticas de los moldes fabricados en PLA: su baja conductividad térmica en comparación con las aleaciones metálicas tradicionales. Los resultados muestran tiempos de enfriamiento que oscilan entre 18 s en paredes delgadas y más de 120 s en zonas de mayor espesor.

A pesar de que estos tiempos son significativamente mayores que los de un molde de acero o aluminio, para fines académicos y de validación de prototipos este comportamiento resulta aceptable. Asimismo, el uso de una densidad de relleno (*infill*) elevada en la impresión del molde (hasta el 80 %) contribuye a mejorar la estabilidad térmica y la resistencia a la deformación durante el enfriamiento de la pieza inyectada.

Caracterización acústica del resonador

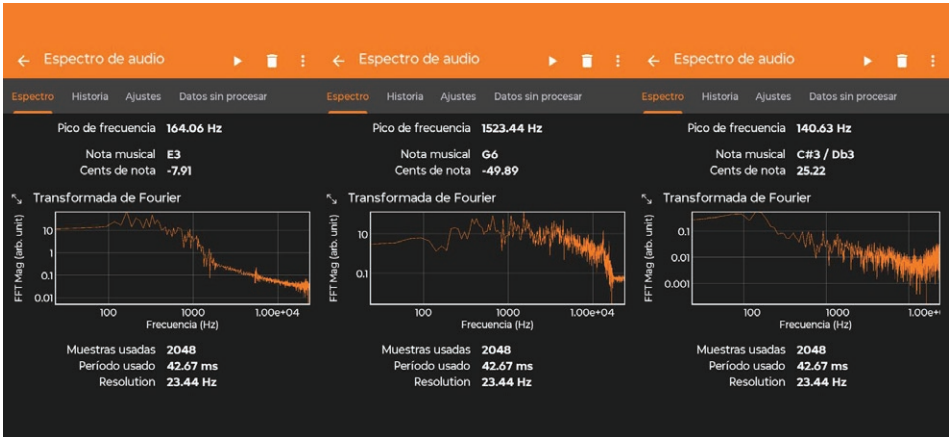
La validación experimental de la pieza terminada se centró en su capacidad resonante. Mediante el uso de la herramienta Phyphox, se identificaron picos de frecuencia característicos (por ejemplo, 164.06 Hz y 1523.44 Hz), los cuales corresponden a los modos de resonancia de la cavidad diseñada. La Figura 4 muestra la respuesta en frecuencia de la caja de resonancia para cada porcentaje de relleno.

Este análisis confirma que la precisión dimensional obtenida mediante el molde impreso en 3D es suficiente para reproducir fenómenos acústicos estudiados desde la antigüedad, como los principios de las cavidades resonantes vitruvianas. Además, la integración de sensores móviles permitió una recolección de datos precisa y de bajo costo, validando la funcionalidad del resonador producido.

Discusión

La integración de CAD, simulación CAE y manufactura aditiva demuestra ser una estrategia efectiva para la producción de tirajes cortos. Si bien el PLA presenta limitaciones térmicas, la optimización de la ubicación del punto de inyección

Figura 4. Respuesta en frecuencia del resonador para diferentes porcentajes de relleno (20 %, 40 % y 80 %)



(Configuración 3 de la Tabla 1) permite mitigar estos efectos al reducir el esfuerzo hidrodinámico sobre el molde. Estos hallazgos coinciden con la literatura actual sobre la viabilidad técnica y económica del uso de polímeros en la fabricación herramental rápida para entornos universitarios.

El análisis térmico evidenció tiempos de enfriamiento mayores en comparación con los moldes metálicos, lo cual representa una limitación inherente a los moldes fabricados mediante impresión 3D. No obstante, para aplicaciones académicas y de prototipado, este comportamiento resulta aceptable y no compromete la validación del diseño.

Conclusiones

1) Viabilidad del *rapid tooling*: se demostró que la fabricación de moldes de inyección mediante impresión 3D en PLA es una alternativa técnica y económicamente viable para tirajes cortos y prototipado funcional en laboratorios universitarios. Esta técnica reduce significativamente los tiempos de desarrollo en comparación con el mecanizado convencional.

2) Optimización del proceso: el uso de herramientas CAE fue determinante para predecir el desempeño del proceso. La configuración de inyección

central resultó ser la más eficiente, al reducir la presión necesaria en un 11.6 % respecto a la configuración lateral, lo que disminuye el riesgo de fallos mecánicos en moldes fabricados con materiales de baja resistencia térmica.

3) Precisión y funcionalidad: a pesar de las limitaciones térmicas del PLA, las piezas obtenidas mantuvieron la precisión geométrica necesaria para cumplir con su función acústica. La detección de frecuencias específicas (164.06 Hz) confirmó que el diseño del resonador responde adecuadamente a los principios teóricos de cavidades resonantes.

4) Sinergia tecnológica: la integración de software de simulación avanzada y herramientas de medición móvil como Phyphox representa un modelo educativo sólido que vincula la teoría de manufactura con la práctica experimental de alta precisión.

Referencias

Atzeni, E. y Salmi, A. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62*, 1147-1155. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1

Braga, N. C. (S. f.). *Proyecto y construcción de cajas acústicas (Parte 1)*. INCB.

Campanelli, S. L., Contuzzi, N., Angelastro, A., & Ludovico, A. D. (2010). Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process. En M. J. Er (Ed.), *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/10432

Dimla, D. E., Camilotto, M. y Miani, F. (2005). Design and optimization of injection moulding programmes. *Journal of Materials Processing Technology, 164-165*, 1294-1300. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.162

Godman, R. (2007). The enigma of Vitruvian resonating vases and the relevance of the concept for today. *The Journal of the Acoustical Society of America, 122*(5), 3054.

Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. Wiley.

Hinczewski, C., Corbel, S. y Chartier, T. (1998). Ceramic bodies by stereolithography with an emphasis on rapid tooling. *Journal of the European Ceramic Society, 18*(6), 583-590. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(97)00186-6

Khosravani, M. R. y Reinicke, T. (2020). On the environmental impacts of 3D printing. *Applied Manufacturing Science, 20*, 100427. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100689

Levy, G. N., Schindel, R. y Kruth, J. P. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies. *CIRP Annals, 52*(2), 589-609. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60206-6

Masood, S. H., & Song, W. Q. (2004). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling. *Materials & Design, 25*(7), 587–594. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.02.009

Puertas, A. C. G. (S. f.). *Diseño de cajas acústicas*. Universidad del País Vasco.

Rosochowski, A. y Matuszak, A. (2000). Rapid tooling: the state of the art. *Journal of Materials Processing Technology, 106*(1-3), 191-198. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00613-0

Sachs, E., Cima, M. y Cornie, J. (1990). Three-dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model. *CIRP Annals, 39*(1), 201-204. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61035-X

Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H. y Stampfer, C. (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: Phyphox. *Physics Education, 53*(4), 045009. https://doi.org/10.1088/1361-6552/aac05e

Zakinthinos, T. y Skarlatos, D. (2006). The effect of ceramic vases on the acoustics of old Greek orthodox churches. *Applied Acoustics, 68*(11-12), 1307-1322. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.07.015

Simulador didáctico de procesos automatizados, basado en PLC y HMI para la formación práctica de estudiantes de ingeniería

Samuel Portillo Contreras,[a*] María Fernanda Gonzaga Rosendo[b]

Abstract

This paper presents the design and implementation of a didactic simulator for industrial automation and control, developed to strengthen engineering education through hands-on learning. The system integrates a Siemens S7-1511C PLC and a Siemens KTP400 Basic HMI, enabling students to practice basic, intermediate, and advanced PLC programming, industrial networks, process monitoring, and simulation of automated systems. The simulator includes electrical interfaces for 24 VDC and 110 VAC, optocoupled modules for stepper and servo motor control, and pneumatic and AC motor control capabilities. Results show that the platform enhances students' technical competencies, diagnostic skills, and understanding of industrial automation architectures.

Keywords: PLC, HMI, automation, engineering education, didactic simulator, Siemens S7-1500.

Introducción

La enseñanza de la automatización industrial requiere entornos prácticos que conecten teoría y aplicación. Estudios previos sobre tableros didácticos y experiencias en laboratorios muestran beneficios en la formación técnica y en la

[a] Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial, Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.
[b] Inversiones Nuevos Proyectos, Saint-Gobain Sekurit.
[*] Autor de correspondencia: samuel.portillo@uaem.mx

inmersión del estudiante en proyectos reales (Portillo Contreras et al., 2025; Portillo Contreras et al., 2024). En este trabajo, se expone un simulador modular que replica procesos industriales básicos (arranque/paro, control de secuencias, alarmas y manejo de E/S, monitoreo de procesos) usando S7-1500 y HMI Siemens, con énfasis en competencias de programación, instrumentación y diagnóstico.

El uso de módulos didácticos con PLC favorece el desarrollo de competencias disciplinares relacionadas con la lógica de control, la instrumentación, el cableado industrial y la resolución de fallas, aspectos esenciales en la industria 4.0 (Martínez Balbín y Garcia Curo, 2025). Asimismo, estudios recientes demuestran que las estaciones didácticas de bajo costo y los entornos de aprendizaje activo mejoran el rendimiento académico y fortalecen habilidades de análisis, diseño y operación de sistemas automáticos (Navarro-Durán et al., 2023).

En este contexto, se presenta el diseño e implementación de un simulador de procesos de automatización y control industrial, basado en un PLC SIEMENS S7 1511C (SIEMENS, 2021) y una HMI Siemens KTP400 Basic (SIEMENS, 2025b); orientado a la enseñanza de programación básica, intermedia y avanzada, redes industriales, monitoreo de procesos, simulación de sistemas y control de actuadores eléctricos y neumáticos. El objetivo del trabajo es describir la arquitectura del simulador, su potencial didáctico y su contribución al desarrollo de competencias profesionales en estudiantes de ingeniería.

Materiales y metodología

El simulador fue diseñado con una arquitectura modular que integra componentes industriales reales, permitiendo prácticas de programación, cableado, diagnóstico y operación.

El control principal está integrado por un PLC Siemens S7 1511C, con E/S digitales y analógicas, HMI Siemens KTP400 Basic, utilizada para operación, alarmas, tendencias y monitoreo. Por otra parte, la programación en TIA Portal, emplea lenguajes como LAD, FBD y SCL, todo lo anterior para garantizar que se utilice equipo de vanguardia a la par de la industria (SIEMENS, 2025b; Berger, 2018).

La interfaz eléctrica y de potencia, pensada como sistema de alimentación dual:

- 24 VCD para señales de control.
- 110 VCA para actuadores de potencia.
- Clemas industriales para prácticas de cableado y diagnóstico.

El diseño inicial del simulador fue desarrollado mediante herramientas de diseño bidimensional (2D), con el objetivo de obtener una visión general del conjunto y del material requerido como se muestra en la Figura 1. Posteriormente, el modelo fue elaborado utilizando diseño tridimensional (3D), lo que permitió contar con una representación más detallada del ensamblaje final y una visualización precisa de la disposición y el montaje de los componentes como se observa en la Figura 2. Finalmente, con base en estas etapas previas de diseño, se realizó el proceso de ensamblaje físico del sistema, obteniendo el montaje final que se presenta en la Figura 3.

Figura 1. Diseño 2D del simulador didáctico y su distribución general

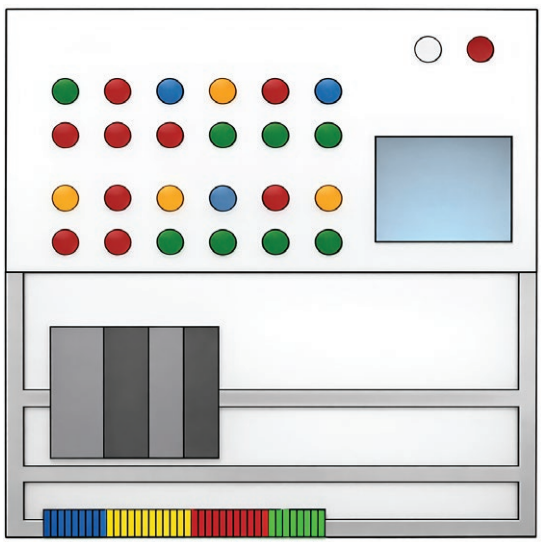


Figura 2. Modelo tridimensional (3D) del simulador didáctico, utilizado para la validación de materiales, estructura mecánica y disposición final de los componentes

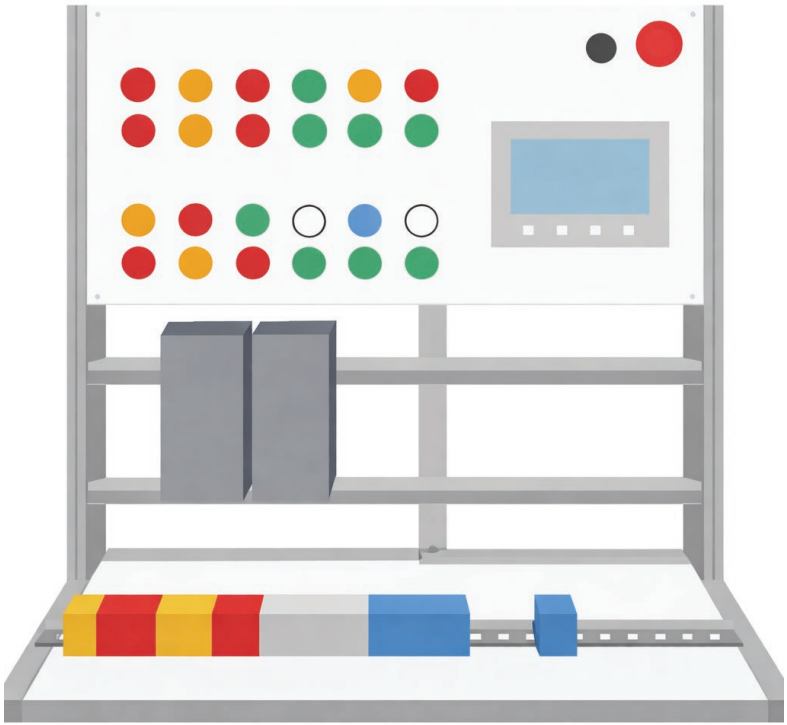
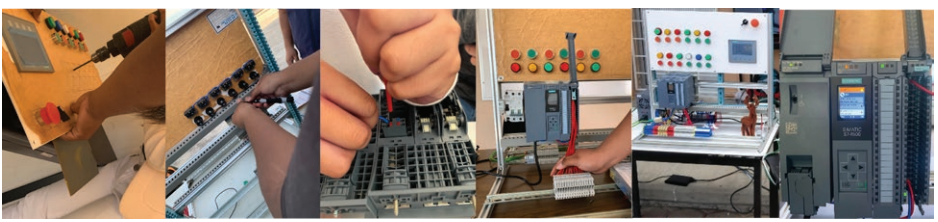


Figura 3. Ensamble del simulador didáctico y conexión de sus módulos eléctricos y de control



Adicionalmente se integran módulos de aislamiento mediante optoacopladores, diseñados para proteger el PLC y permitir el control seguro de motores a pasos, servomotores, actuadores y sistemas integrados para control de motores monofásicos y trifásicos, módulos de control de motores o *drivers*, con la posibilidad de integración de sistemas neumáticos para prácticas de automatización secuencial.

Para los módulos de aislamiento cuyo diseño electrónico inicial se muestra en la Figura 4, se utilizó un *software* de diseño y simulación de circuitos, el cual permitió llevar a cabo la simulación y verificación de su correcto funcionamiento. Posteriormente, una vez validado el diseño, se procedió a su impresión sobre una placa fenólica, como se observa en la Figura 5, donde posteriormente se realizaron los procesos de soldadura de los bornes de conexión, las resistencias y las bases para los optoacopladores, asegurando así la correcta integración de los componentes electrónicos con el tablero como se aprecia en la Figura 6.

Figura 4. Diseño y simulación del circuito de aislamiento con optoacopladores

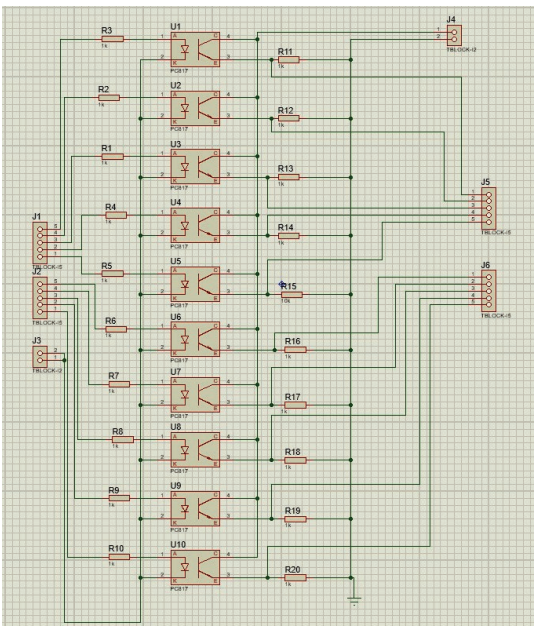


Figura 5. Fabricación del módulo de aislamiento en placa fenólica

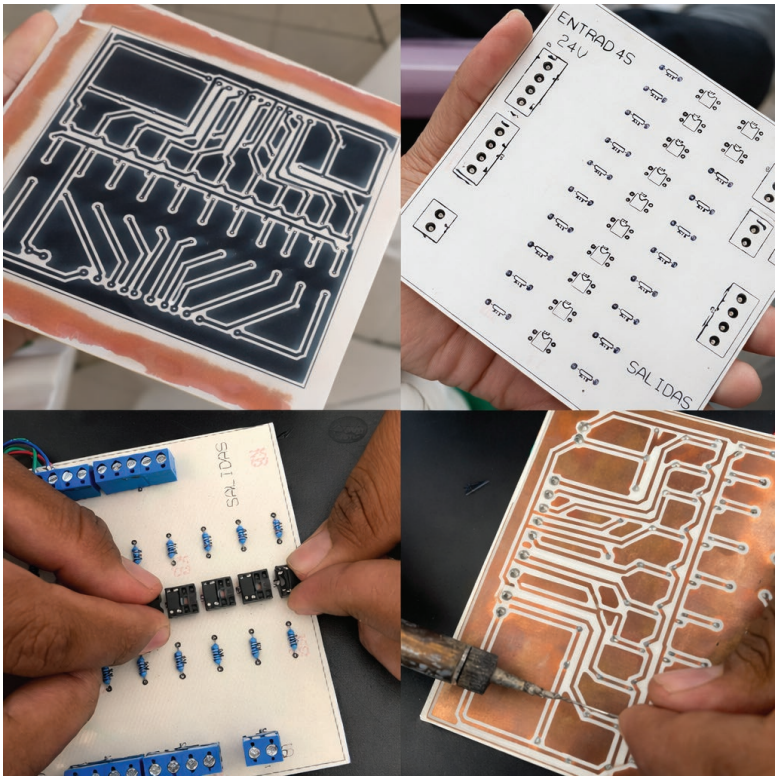
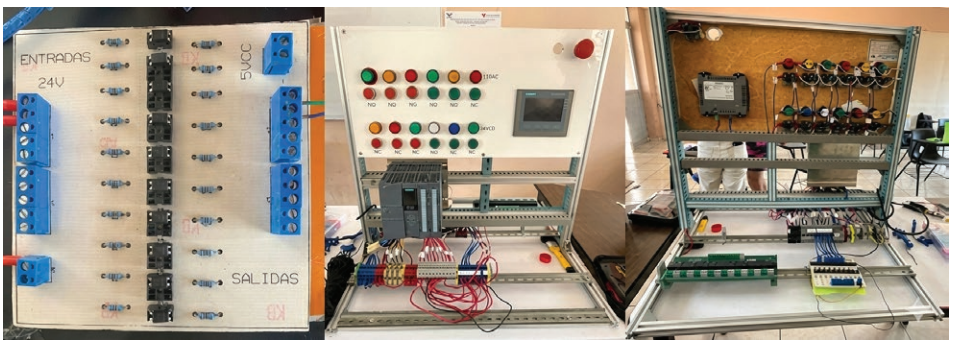


Figura 6. Integración del módulo de aislamiento y pruebas de operación del tablero didáctico



El tablero permite realizar las siguientes prácticas:

- Programación básica: arranque/parada, enclavamientos, temporizadores.
- Programación intermedia: secuencias, contadores, alarmas, modos de operación.
- Programación avanzada: bloques FC/FB, estructuras, *arrays*, simulación de procesos.
- Redes industriales básicas: PROFINET, comunicación HMI PLC.
- Simulación de procesos industriales.
- Diagnóstico de fallas en cableado y lógica.

La metodología de uso se basa en aprendizaje activo, siguiendo recomendaciones de la literatura sobre estaciones didácticas y entornos prácticos en ingeniería (Navarro-Durán, 2023; Maya Palacios, 2017).

Resultados

El equipo permite realizar diferentes prácticas formativas, así como desarrollar proyectos de automatización más avanzados como los ejemplos que se muestran en la Figura 7.

La implementación del simulador permitió a los estudiantes:

- Comprender la arquitectura PLC-HMI y su interacción mediante una red PROFINET.
- Desarrollar programas funcionales en TIA Portal utilizando diferentes lenguajes.
- Realizar prácticas de cableado industrial con clemas reales.
- Controlar motores de CA, motores a pasos y servomotores mediante módulos de aislamiento.
- Operar sistemas neumáticos y validar secuencias de automatización.
- Diseñar interfaces HMI para operación, alarmas y monitoreo.

- Simular procesos industriales y analizar su comportamiento en tiempo real.

Estas competencias que son parte de los planes de estudio 2017 y 2024 han permitido que los estudiantes de Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial de las 2.ª, 3.ª, 4.ª y 5.ª generaciones de la Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla tengan una mejor inserción laboral, al demostrar el dominio de estas habilidades durante la realización de sus residencias profesionales. Para los estudiantes que participan en la investigación, desarrollo y ensamblaje de estos prototipos didácticos, constituye una fuente de adquisición de experiencias que garantizan un mejor desempeño laboral y profesional (Tlatelpa Becerro et al., 2025).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Gutiérrez García (2025) y Morán Solano et al. (2018), quienes destacan que los tableros didácticos incrementan la retención del conocimiento y la capacidad de diagnóstico. Asimismo, se observaron mejoras en competencias de control automático, similares a las documentadas por Navarro-Durán et al. (2023).

Conclusiones

El simulador desarrollado constituye una herramienta didáctica robusta y versátil para la formación en automatización industrial. Su diseño modular, basado en un PLC Siemens S7 1511C y una HMI KTP400 Basic, permite abordar desde prácticas básicas hasta programación avanzada, redes industriales, simulación de procesos y control de actuadores eléctricos y neumáticos.

Los resultados obtenidos muestran que el simulador favorece el aprendizaje significativo, fortalece competencias profesionales y mejora la capacidad de los estudiantes para enfrentar problemas reales de automatización. Se recomienda su integración en cursos de control, instrumentación, automatización y sistemas mecatrónicos, así como su ampliación futura con módulos de comunicación industrial avanzada y registro de datos.

Figura 7. Prácticas realizadas con el simulador didáctico, integrando elementos neumáticos, botones, indicadores luminosos, motores de corriente alterna y motores a pasos



Referencias

Berger, H. (2018). *Automating with SIMATIC S7-1500: Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional* (2.ª ed.). Publicis Publishing.

Gutiérrez García, A. (2025). Diseño de tablero didáctico para prácticas de automatización industrial con PLC, unidad manufactura routing piping and tubing. *IECC México Review, 2*(1). https://ieccmexicojournal.com/index.php/publishing/article/view/17

Martínez Balbín, L. y Garcia Curo, G. (2025). Didactic implementation of programmable automata for the optimization of industrial processes. *Journal of Scientific and Technological Research Industrial, 6*(1). https://doi.org/10.47422/jstri.v6i1.58

Maya Palacios, E. U., González Hernández, J. G. y Ocampo Casados, J. L. (2017). Aprendizaje basado en problemas para la enseñanza de los PLC en la Universidad Tecnológica de Altamira. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo, 8*(15). https://doi.org/10.23913/ride.v8i15.311

Morán Solano, M. G., Moreno Jiménez, J. y Martínez Galván, A. X. (2018, octubre). *Diseño e implementación de un panel didáctico con PLC Siemens S7-1200*. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica, Memorias ELECTRO, Chihuahua, Chihuahua, México.

Navarro-Durán, D., Félix-Herrán, L. C., Membrillo-Hernández, J., Craig, K. C., Ramírez-Cadena, M. J. y Ramírez-Mendoza, R. A. (2023). Active learning to develop disciplinary competencies related to automatic control in engineering curricula using low cost do-it-yourself didactic stations. *Frontiers in Education, 7*. https://doi.org/10.3389/feduc.2022.1022888

Portillo Contreras, S., Gallardo, H. D., Yáñez, A., Gonzaga Rosendo, M. F. y Sánchez Vargas, Ó. (2024). Diseño de tablero didáctico para el aprendizaje de automatización y control con PLC Simatic S7-300 Siemens. En Á. Tlatelpa Becerro y G. R. Carbajal Pérez (Coords.), *De la investigación a la aplicación: un enfoque práctico* (pp. 115-123). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Portillo Contreras, S., Gonzaga Rosendo, M. F. y Contreras Ortega, L. (2025). Experiencia y buenas prácticas en el diseño e implementación de tableros didácticos para el aprendizaje automatización y programación de PLC en educación superior. En Á. Tlatelpa Becerro y G. R. Carbajal Pérez (Coords.), *Paradigmas en la ciencia y la ingeniería* (pp. 63-72). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

SIEMENS. (2021, mayo). *SIMATIC. S7-1500. CPU 1511C-1 PN (6ES7511-1CK01-0AB0)* [Manual de producto]. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/675/109478675/att_898614/v1/s71500_cpu1511c_1_pn_manual_es-ES_es-ES.pdf

SIEMENS. (2025). *Programming guidelines and programming style guide for SIMATIC S7-1200, S7-1500 and WinCC (TIA Portal)*. https://support.industry.siemens.com/cs/document/81318674

SIEMENS. (2025, febrero). *6AV2123-2DB03-0AX0* [Hoja de datos]. https://support.industry.siemens.com/teddatasheet/?format=pdf&mlfbs=6AV2123-2DB03-0AX0&language=es&caller=SIOS

Tlatelpa Becerro, Á., García Oliván, J. S., Portillo Contreras, S., Navarrete Procopio, M. y Zezatti Flores, V. (2025). Inmersión del estudiante en la investigación. En Á. Tlatelpa Becerro, y G. R. Carbajal Pérez (Coords.), *Avances en ingeniería: investigaciones y aplicaciones* (pp. 11-22). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Universidad Autónoma del Estado de Morelos. (2017). *Plan de estudio: Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial*.

Universidad Autónoma del Estado de Morelos. (2024). *Plan de estudio: Ingeniería en Robótica y Sistemas de Manufactura Industrial*.

Simulación y análisis comparativo del desempeño de tecnologías fotovoltaicas policristalina y monocristalina

H. Coello-Sánchez,[a*] M. A. Chagolla-Aranda,[a] M. A. Chagolla-Gaona,[b] E. J. Moreno-Carpintero[b]

Abstract

This paper presents a comparative analysis between monocrystalline and polycrystalline photovoltaic technologies. The study was conducted to evaluate performance parameters such as maximum power, generated energy, and conversion efficiency, seeking sustainable alternatives in contrast to the use of fossil fuels. The research was carried out through an annual numerical simulation using TRNSYS software, powered by meteorological data from the state of Morelos, Mexico. Two modules with identical nominal power (335 W) were compared to isolate differences attributable exclusively to each technology. The results showed that, although both technologies had similar levels of energy generation, reaching maximum power in March, the monocrystalline panel proved to be technically superior. It exhibited higher efficiency (20.20 %) over a smaller area and a better temperature coefficient (-0.35 % /°C), ensuring greater stability and less power degradation in hot environments.

Keywords: solar energy, photovoltaic panel, annual simulation, maximum power point, electrical energy, solar radiation.

[a] Departamento de Ingeniería Mecánica, TecNM/CENIDET, Campus Apatzingán.
[b] Departamento de Ingeniería Electromecánica, TecNM/IT Zacatepec.
[*] Autor de correspondencia: d23ce140@cenidet.tecnm.mx

Introducción

La crisis energética y ambiental representa uno de los desafíos más comunes en el siglo XXI, impulsada por la necesidad de sustituir los combustibles fósiles, responsable de emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero, por sistemas basados en fuentes de energía renovable (Kalogirou, 2024). Esta transición debe realizarse en un contexto de demanda energética creciente, determinado por el incremento demográfico y la acelerada industrialización de las economías en desarrollo (Kalogirou, 2024). La naturaleza finita y agotable de los recursos no renovables los torna insuficientes para garantizar la seguridad energética a largo plazo. En consecuencia, la identificación y desarrollo de recursos energéticos limpios, sostenibles y escalables se ha consolidado como una prioridad científica, tecnológica y política (Kalogirou, 2024; Pathak et al., 2022).

Entre las alternativas viables, la energía solar destaca como un recurso sostenible, de bajo costo potencial, inagotable y de amplia disponibilidad. El sol emite aproximadamente 3.8×10^{23} kW de su potencia calorífica, de los cuales la Tierra intercepta alrededor de 1.8×10^{14} kW; la radiación restante se dispersa, refleja o es absorbida por la atmósfera y las nubes (Pathak et al., 2022). La magnitud de este flujo energético estima que 1.7×10^{22} J de la energía solar recibida en 1.5 días equivale a la energía contenida en tres billones de barriles de reservas petroleras. Asimismo, el Sol provee en una hora un flujo energético superior al consumo energético anual global (aproximadamente 4.6×10^{20} J) (Pathak et al., 2022).

La energía solar se aprovecha mediante dos vías principales: aplicaciones térmicas, donde se utiliza como fuente de calor directo, y aplicaciones eléctricas, donde incluye la generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos (PV, por sus siglas en inglés) (Dada y Popoola, 2023). La conversión fotovoltaica se caracteriza por la absorción de radiación solar y la transformación de la energía de los fotones en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico (Pathak et al., 2022; Dada y Popoola, 2023).

En la actualidad, los sistemas fotovoltaicos comercialmente dominantes se basan en materiales semiconductores inorgánicos, cuya fabricación implica

procesos de alta pureza y elevado consumo energético, lo que conlleva costos significativos y una huella ambiental considerable.

Entre estos, las células solares de silicio constituyen la tecnología predominante, las cuales se clasifican principalmente en silicio cristalino (c-Si), silicio monocristalino (sc-Si) y silicio policristalino (mc-Si) en función de la estructura cristalina del material absorbente (Kalogirou, 2024; Pathak et al., 2022).

Un estudio evaluó el consumo energético de una planta fotovoltaica durante un periodo de 172 días, logrando una generación acumulada de 19,055.14 kWh (Rodríguez-López et al., 2021). Por otro lado, un estudio reciente realizó el diseño y la simulación de un sistema fotovoltaico en una parcela de 1.5 hectáreas en la zona agrícola de Temuco, Chile, mostrando una generación de energía anual aproximada de 2,166.36 kWh (Rodriguez et al., 2024).

La generación de energía eléctrica mediante sistemas fotovoltaicos constituye una alternativa relevante para atender la demanda energética en sectores residenciales, comerciales e industriales, ya sea en configuraciones autónomas o conectadas a la red eléctrica (Dada y Popoola, 2023). El rendimiento de estas tecnologías depende del material semiconductor empleado, destacando el silicio monocristalino y policristalino, cuyas diferencias en eficiencia y costo determinan su viabilidad técnica y económica (Kalogirou, 2024). Este trabajo presenta un análisis comparativo de dos tecnologías fotovoltaicas (monocristalina y policristalina), evaluando la potencia máxima, energía generada y eficiencia de conversión. La simulación se realizó mediante el *software* TRNSYS (Programa de Simulación de Sistemas Transitorios, por sus siglas en inglés), utilizando datos meteorológicos obtenidos en el estado de Morelos, México.

Fundamentos teóricos

A continuación, se muestran los conceptos que describen el comportamiento de la potencia máxima en PV, la obtención de la energía generada y el cálculo de la eficiencia eléctrica.

Punto de máxima potencia

Los paneles fotovoltaicos generan una salida de voltaje y corriente cuya magnitud depende directamente de la radiación solar incidente y la temperatura ambiente en condiciones operativas. A partir de estas variables, se obtienen las curvas características del módulo, las cuales representan el comportamiento eléctrico del dispositivo bajo diferentes condiciones. Estas curvas, denominadas corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V), tal como se ilustran en la Figura 1, permiten analizar el punto de máxima potencia (MPP), que sirve para el diseño, simulación y evaluación del desempeño de sistemas fotovoltaicos (Dada y Popoola, 2023).

El MPP es el punto de operación de los PV en el que entrega la máxima potencia a la carga y está determinado por la Ecuación 1 (Dada y Popoola, 2023).

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde V_{max} representa el voltaje máximo de salida, e I_{max} corresponde a la corriente máxima de salida.

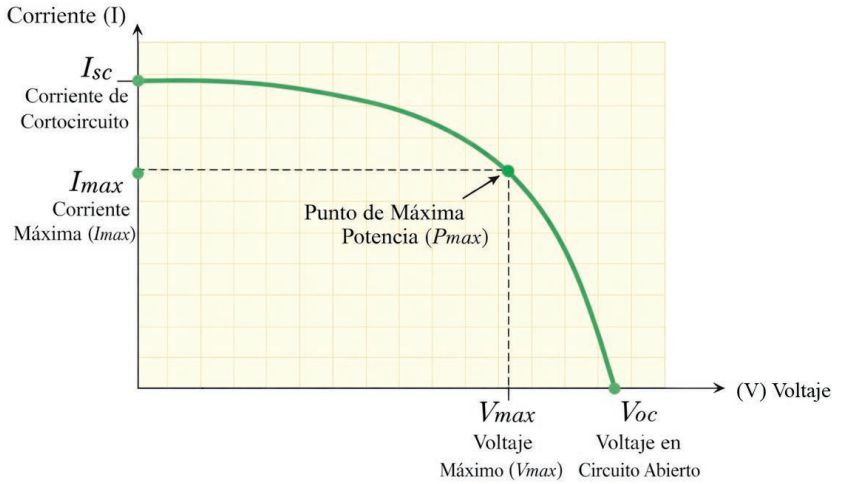
Energía eléctrica generada

La generación eléctrica en un intervalo de tiempo se obtiene mediante la integración de la P_{max} respecto al tiempo, esto se representa mediante la Ecuación 2.

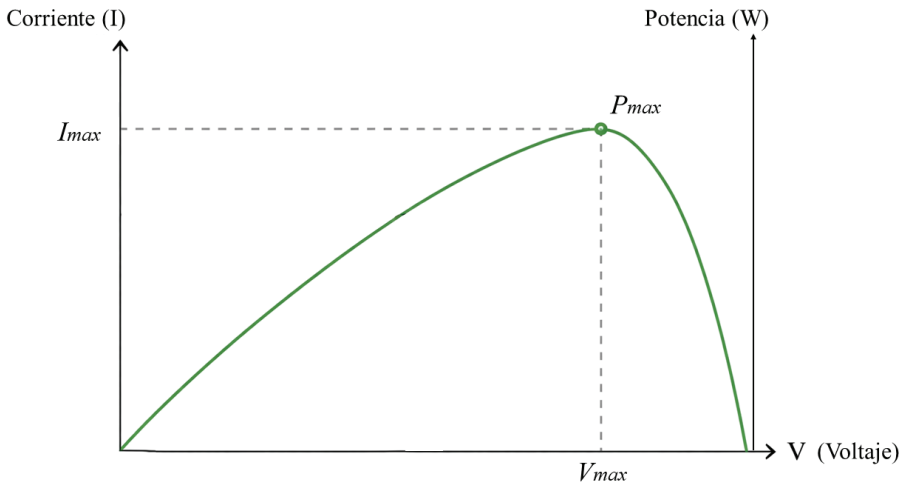
$$E_g = \int_{t_1}^{t_2} P(t)\, dt \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde E_g es la energía generada por el panel, t_1 y t_2 son los límites de integración (inicio y fin del mes en horas) y *dt* es el diferencial del tiempo (incremento del tiempo).

Figura 1. Curva característica I-V (a) y curva característica de P-V (b) (Dada y Popoola, 2023)



a)



b)

Eficiencia eléctrica

La eficiencia eléctrica (η_{ele}) se define como la relación entre la P_{max} generada por los módulos y la potencia de la radiación solar incidente (G) sobre el área total (A) de la superficie (Kalogirou, 2024).

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \approx \frac{P_{max}}{G \cdot A} \times 100 \qquad \text{Ec. 3}$$

Metodología

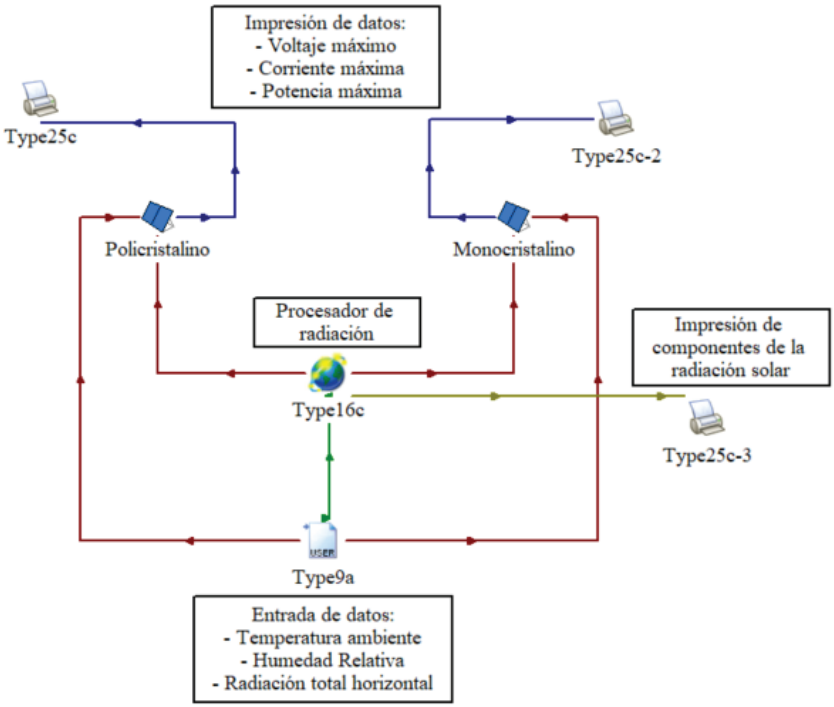
En esta sección, se detalla el procedimiento metodológico implementado para la obtención de resultados, incluyendo la especificación del modelo de simulación, la definición de los parámetros operativos y el proceso de estimación de la potencia máxima anual mediante la simulación numérica.

Modelo de simulación

TRNSYS es un entorno para la simulación transitoria de sistemas térmicos, energéticos y edificios. Las simulaciones se construyen conectando modelos de componentes individuales conocidos como *types*, para formar un modelo completo (TRNSYS 18, 2018).

La Figura 2 presenta el esquema de los diferentes *types* para la ejecución de las simulaciones y el análisis de los paneles fotovoltaicos. El modelo integra el Type9a, responsable del ingreso de datos meteorológicos provenientes de la estación del Tecnológico Nacional de México, Campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (Coello-Sánchez, 2025). Estos datos se dirigen al bloque Type16c, el cual ejecuta el procesamiento de la radiación solar, transformando la irradiancia global horizontal en sus componentes difusa y directa. Posteriormente, el componente de radiación directa es utilizado

Figura 2. Modelo de simulación de PV monocristalino y policristalino



como entrada en el módulo Type103b, que modela un panel fotovoltaico monocristalino y otro policristalino, cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 1. Finalmente, el Type25c registra las variables de salida de los módulos fotovoltaicos en un archivo TXT, entre las que se incluyen el V_{max}, la I_{max} y la P_{max}, parámetro de especial relevancia para el presente estudio.

Para la caracterización y análisis comparativo se emplearon las hojas de datos técnicos de dos módulos fotovoltaicos de P_{max} equivalente (335 W), representativos de tecnologías de silicio cristalino distintas: un panel monocristalino (modelo SPV335-PM3-60, fabricado por SpolarPv) y un panel policristalino (modelo JAP72S01-335/SC, fabricado por JA Solar). La selección de unidades de potencia idéntica permite aislar y evaluar las diferencias en el rendimiento y los parámetros eléctricos atribuibles exclusivamente a la tecnología de célula empleada.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los módulos SPV335-PM3-60 y JAP72S01-335/SC.

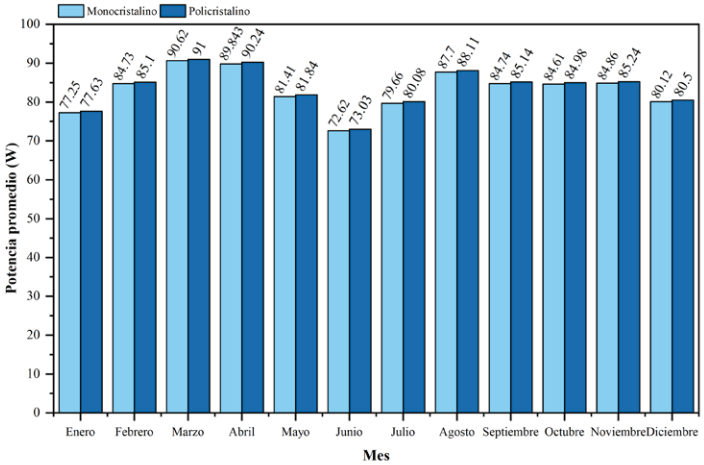
Parámetro	Policristalino	Monocristalino
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	9.35 A	10.49 A
Voltaje en circuito abierto (V_{oc})	46.70 V	41.49 V
Voltaje en máxima potencia (V_{max})	37.83 V	34.03 V
Corriente en máxima potencia (I_{max})	8.87 A	9.84
Coeficiente de temperatura en Isc (β)	+0.058 %/°C	+0.045 %/°C
Coeficiente de temperatura en Voc (α)	-0.330 %/°C	-0.35 %/°C
Área del módulo fotovoltaico	1.95 m^2	1.65 m^2

La configuración temporal de la simulación se determinó con base en las 8760 horas que conforman el año 2025. Por lo que el modelo produjo un conjunto de 8760 datos horarios, que representan de manera continua el comportamiento del sistema durante todo el periodo simulado.

Resultados

Tras la ejecución de las simulaciones, se obtuvieron los perfiles horarios de potencia, los cuales se muestran en la Figura 3. Con base en los resultados generados por el modelo de simulación, se calcularon los valores promedio mensuales. El análisis de dichos datos evidenció que la potencia máxima se alcanzó durante el mes de marzo, con un promedio de 90.62 W para el módulo monocristalino y 91.00 W para el policristalino. Por el contrario, el mínimo desempeño se observó en junio, con promedios de 72.62 W y 73.03 W para el módulo monocristalino y policristalino, respectivamente.

Figura 3. Potencia horaria mensual



La energía eléctrica generada por los PV se determinó aplicando la Ecuación 3. La Figura 4 ilustra la distribución mensual de la energía eléctrica. Se observa que el máximo valor se registró en marzo, con producciones de 67.70 kWh para el módulo policristalino y 67.42 kWh para el monocristalino. Por el contrario, la menor generación ocurrió en junio, con valores de 52.58 kWh (policristalino) y 52.28 kWh (monocristalino).

De forma anual, la generación total acumulada fue de 729.03 kWh para el módulo monocristalino y de 732.46 kWh para el policristalino. Esta diferencia cuantitativa representa una diferencia de 3.43 kWh, es decir, una diferencia porcentual absoluta del 3.43 % a favor de la tecnología policristalina bajo las condiciones de estudio.

Respecto a la eficiencia eléctrica, esta se determinó al aplicar la Ecuación 3, excepto en aquellos casos donde el fabricante proporciona dicho valor en la hoja de datos correspondiente. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Figura 4. Energía eléctrica mensual

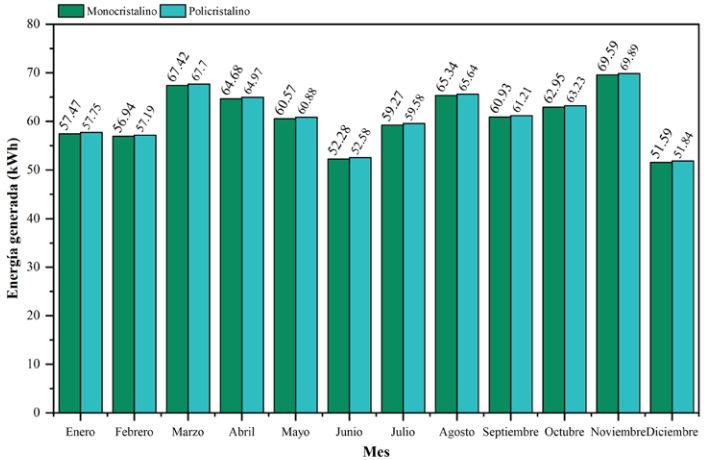


Tabla 2. Eficiencia eléctrica de los módulos fotovoltaicos

Parámetro	Policristalino	Monocristalino
Eficiencia (η)	17.17 %	20.20 %

Conclusiones

Los análisis comparativos de potencia y generación eléctrica entre ambas tecnologías arrojaron valores numéricamente próximos.

Se confirma que el módulo monocristalino presenta una mayor eficiencia nominal (20.20 %), permitiéndole alcanzar una potencia de 335 W con un área reducida (1.65 m^2). Por el contrario, el módulo policristalino, con una eficiencia del 17.17 %, requiere un área mayor (1.95 m^2) para lograr la misma potencia.

No obstante, se observa una leve superioridad en los valores de generación de la tecnología policristalina frente a la monocristalina bajo las condiciones de estudio, con una diferencia anual de 3.43 kWh.

Un parámetro crítico que condiciona el rendimiento real en campo es el coeficiente de temperatura de P_{max} (γ). El módulo monocristalino registra un γ de -0.35 %/°C, mientras que el policristalino presenta uno más alto de -0.40 %/°C. Este dato implica que, ante incrementos de temperatura, la potencia del módulo policristalino se degradará en mayor medida que la del monocristalino. Por lo tanto, aunque en condiciones de prueba estándar (STC) las potencias sean equivalentes, el monocristalino ofrecerá un mejor desempeño energético en entornos con elevadas temperaturas operativas, mitigando en mayor proporción las pérdidas por calentamiento.

El panel monocristalino, al tener menor área y un peso de 18 kg, favorece el aprovechamiento del espacio de instalación, reduce requerimientos estructurales y mejora, en consecuencia, el costo por watt instalado. Por su parte, el módulo policristalino exhibe un área mayor y un peso de 22 kg, implicando un mayor uso de superficie, aunque ofrece como ventaja un amplio historial de desempeño en campo y alta confiabilidad industrial.

El análisis de los módulos PV, pese a la P_{max} similar, la aplicación en instalaciones depende del enfoque del proyecto: el SPV335-PM3-60 ofrece mayor flexibilidad de instalación y menores costos iniciales, lo que lo hace más adecuado para sistemas residenciales y comerciales de pequeña escala, donde se busca maximizar la rentabilidad y simplificar el montaje; en cambio, el JAP72S01-335/SC, respaldado por un fabricante con amplia trayectoria y validación comercial, resulta más conveniente para proyectos comerciales e industriales de mayor envergadura, en los que se prioriza la confiabilidad operativa, la madurez tecnológica y la seguridad de inversión a largo plazo.

Agradecimientos

En el presente trabajo se expresa un sincero reconocimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el financiamiento otorgado para la realización de esta investigación. Asimismo, se agradece al Tecnológico Nacional de México, Campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico y al Campus Zacatepec, por su valiosa contribución en

la dirección académica y científica, importantes para el adecuado desarrollo del presente estudio.

Referencias

Coello-Sánchez, H. (2025). *Estudio de la generación de energía eléctrica de un panel solar fotovoltaico con modelos matemáticos y datos experimentales en el estado de Morelos* [Tesis de maestría]. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, repositorio Nacional.

Dada, M. y Popoola, P. (2023). Recent advances in solar photovoltaic materials and systems for energy storage applications: a review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 12*(1), 66. https://doi.org/10.1186/s43088-023-00405-5

Kalogirou, S. A. (2024). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.X0001-5

Pathak, S. K., Sharma, P. O., Goel, V., Bhattacharyya, S., Aybar, H. y Meyer, J. P. (2022). A detailed review on the performance of photovoltaic/thermal system using various cooling methods. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 51*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101844

Rodriguez, P. L., Amigo, L., Gatica, G., Aguila, G., Vidal-Pacheco, L. y Coronado-Hernández, J. R. (2024). Design and feasibility study for the evaluation of an Agrovoltaics generation system: Case of Temuco in Chile. *Procedia Computer Science, 231*, 642-647. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.170

Rodríguez-López, J., Robles-Lizárraga, A., Encinas-Guzmán, M. I., Correa-Díaz, F. y Dévora-Isiordia, G. E. (2021). Assessment of fixed, single-axis, and dual-axis photovoltaic systems applied to a reverse osmosis desalination process in Northwest Mexico. *Desalination and Water Treatment, 234*, 399-407. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27614

TRNSYS 18. (2018). *A TRaNsient SYstems Simulation Program*. https://sel.me.wisc.edu/trnsys

Diseño y análisis del rendimiento termosolar de sistemas fotovoltaicos conectados a la red en dos regiones de México

Omar Oziel Vázquez Hernández,[a*] Omar Arturo Castillo Méndez,[a] Mardero José Toledo Wong,[a] Ma. Guadalupe López López,[a] Víctor Manuel Alvarado Martínez[a]

Abstract

This paper presents the design and sizing of a grid-connected photovoltaic system based on electrical load demand and solar resource conditions. Energy consumption is estimated through load analysis to determine the required photovoltaic capacity. Two Mexican regions with different climates—Jojutla, Morelos, and Mazatán, Chiapas—are evaluated to analyze the effects of solar irradiance and temperature on system performance. The photovoltaic generator is sized using peak sun hours, incorporating thermal effects through temperature correction models. Electrical design aspects, such as conductor sizing, voltage drop, and protection devices, are also considered. The results demonstrate that, despite climatic differences, the proposed system ensures adequate energy generation and safe operation in both locations, emphasizing the importance of temperature in photovoltaic system design.

Keywords: photovoltaic systems, grid-connected systems, system sizing, solar resource assessment, ambient temperature effects.

[a] Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
[*] Autor de correspondencia: m25ce020@cenidet.tecnm.mx

Introducción

Estudios recientes han propuesto metodologías de dimensionamiento fotovoltaico basadas en el análisis de la carga eléctrica, la radiación solar y el rendimiento de los paneles en condiciones reales. Una adecuada caracterización de la demanda energética optimiza la generación y el desempeño del sistema, especialmente en aplicaciones de iluminación y electrificación local (Angulo Guerrero y González Santana, 2023). El rápido crecimiento de los sistemas fotovoltaicos (FV) ha hecho del dimensionamiento un factor clave para su viabilidad técnica y económica, mientras que la variabilidad del recurso solar, la intermitencia de la generación y la integración de almacenamiento exigen metodologías de diseño confiables y eficientes (Khenissi et al., 2021; Zhang et al., 2024; Koutroulis et al., 2006).

Un dimensionamiento inadecuado genera sobrecostos, baja rentabilidad, degradación prematura o incumplimiento de criterios de confiabilidad energética, especialmente en sistemas aislados o híbridos (Khatib y Muhsen, 2020; Yang et al., 2008). Por ello, se han propuesto enfoques de optimización multiobjetivo (Allwyn et al., 2022; Mohammed Ridha, 2020) y metodologías analítico-iterativas para estimar con precisión los parámetros del modelo de diodo único (Choulli et al., 2026), mejorando la predicción del comportamiento de módulos fotovoltaicos. En este contexto, el uso de circuitos equivalentes y formulaciones analíticas explícitas, como aquellas basadas en la función de Lambert W (Li et al., 2023), ha permitido extraer parámetros del modelo fotovoltaico directamente desde las hojas de datos del fabricante, facilitando la simulación del comportamiento I-V bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura sin requerir campañas experimentales extensas (Cubas et al., 2014). Asimismo, estudios recientes han demostrado que la precisión de los modelos numéricos del sistema fotovoltaico depende significativamente de las condiciones iniciales empleadas en los métodos iterativos de solución, afectando la convergencia, estabilidad y eficiencia computacional, especialmente cuando el sistema se integra con convertidores electrónicos de potencia (Reshma y Padmasali, 2025). La expansión hacia nuevas configuraciones y aplicaciones (Wei et al., 2022) introduce desafíos

asociados a condiciones ambientales, estrategias de operación y a la interacción con la red eléctrica (Marocco et al., 2024). En sistemas fotovoltaicos conectados a red, la estabilidad de los parámetros eléctricos de la red de baja tensión influye directamente en la eficiencia global y en la capacidad de generación del sistema, siendo necesario considerar estos efectos dentro del proceso de diseño y modelado para garantizar un desempeño adecuado en condiciones reales de operación (Cáceres et al., 2012). En este contexto, la adecuada selección del generador FV, el almacenamiento y los equipos de conversión es clave para maximizar el desempeño del sistema. Este trabajo presenta el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos en dos regiones de México, Jojutla (Morelos) y Mazatán (Chiapas), considerando sus condiciones climáticas y energéticas. Con base en la estimación de la demanda eléctrica y el análisis del recurso solar, se propone una metodología para dimensionar el generador fotovoltaico, el almacenamiento y los equipos de acondicionamiento de potencia, orientada a soluciones energéticas sustentables y adaptadas a condiciones reales de operación.

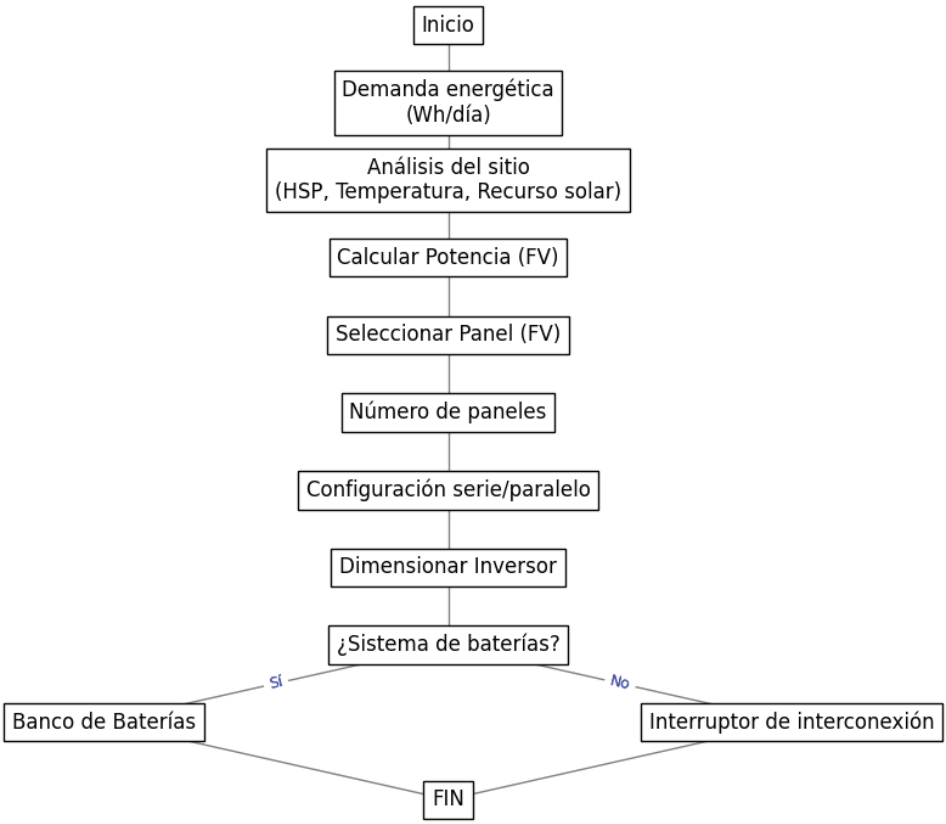
Materiales y metodología

La metodología empleada para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se basa en un enfoque energético que integra el análisis de la demanda eléctrica como se muestra en la Figura 1 y la caracterización del recurso solar y el cálculo de los principales componentes del sistema. Cada etapa se desarrolla a partir de criterios técnicos ampliamente aceptados, con el objetivo de garantizar un diseño confiable, eficiente y adecuado a las condiciones de operación establecidas. En esta metodología, se emplearán dos casos en diferentes localidades, pudiendo hacer una comparativa respecto al dimensionamiento en diferentes zonas de México. Asimismo, se describen detalladamente, los materiales, procedimientos, herramientas y equipos utilizados en el trabajo.

Demanda de cargas

Para dimensionar el sistema fotovoltaico, se identificaron las cargas de mayor uso desglosados en la Tabla 1. Su potencia nominal y el tiempo de operación diaria, lo que permitió estimar el consumo energético y la demanda eléctrica total.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de dimensionamiento de un sistema fotovoltaico



Demanda de cargas: caso de estudio

Tabla 1. Cuadro de cargas

Cantidad	Carga	P (W)	h	Wh
1	TV	300	3	900
1	Refrigerador	150	24	3600
7	iluminación	70	12	840
1	Consola	100	3	300
1	Microondas	1000	0.5	500
1	Celular	100	0.3	30
Total				6170

Sitios de análisis

Para analizar el comportamiento del módulo, se tomaron dos sitios: Jojutla, Morelos, y Mazatán, Chiapas. Las características de ambos se muestran en la Tabla 2.

Temperatura promedio diaria y recurso solar

Para las temperaturas promedio diarias durante el mes de diciembre, a partir de la base de datos de recurso solar (National Aeronautics and Space Administration, 2026), se obtiene la radiación promedio en $kWh/m^2/día$ y la hora pico (HSP) en h del mes de diciembre del año 2025.

Tabla 2. Promedio de radiación solar, Horas Sol Pico, temperaturas (°C) mínimas y máximas en diciembre en Mazatán y Jojutla con coordenadas

Ubicación	Latitud	Longitud	Temp. máx.	Temp. min.	Radiación	HSP
Jojutla, Morelos	18.62	-99.18	28.94	14.52	4.79	4.79
Mazatán, Chiapas	14.86	-92.45	35.71	23.77	5.03	5.03

Las HSP se definen como la irradiación diaria equivalente expresada en horas a una irradiancia constante de 1000 W/m^2 , y se calculan como:

$$HSP = \frac{G_d}{1000} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde G_d es la irradiación diaria promedio en $Wh/\ m^2 \cdot día$.

Potencia fotovoltaica requerida

La potencia fotovoltaica instalada requerida para cubrir la demanda energética diaria se calcula mediante la expresión:

$$P_{FV} = \frac{E_d}{HSP} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde: P_{FV} es la potencia fotovoltaica requerida (kW), E_d es la demanda energética diaria ($kWh/día$), HSP son las horas sol pico de la localidad (h).

Sustituyendo los valores en la Ecuación 2 dependiendo de la localidad, para Jojutla corresponde a 1.29 kW y para Mazatán equivale a 1.23 kW.

Selección de modulo fotovoltaico y selección del inversor

Para el análisis se toma el módulo fotovoltaico de la marca Trina Solar (2026), y para la conversión de corriente, se selecciona el microinversor de la marca APsystems (2026).

Selección del número de módulos fotovoltaicos

Determinada la potencia fotovoltaica requerida, se calcula el número de módulos a partir de la potencia nominal del módulo, el número de módulos requeridos se calcula de la siguiente manera:

$$N = \frac{P_{FV}}{P_{mod}} \qquad \text{Ec. 3}$$

El número de módulos que necesitaron utilizando la Ecuación 3 fueron 2.53 para Jojutla y 2.41 para Mazatán, debido a la configuración que propone el microinversor, se aumenta un módulo más para que cumpla los requisitos, quedando cuatro en total; las potencias instaladas para ambos casos son 2.04 kWp.

Análisis de comportamiento del módulo fotovoltaico

Para complementar el dimensionamiento, es necesario analizar el comportamiento del módulo fotovoltaico en función de la radiación solar como de la temperatura ambiente. De tal manera, se retomaron los datos del panel de estudio en la Tabla 3.

Para obtener un comportamiento del módulo debido a los efectos del recurso solar y la temperatura, se parte de un modelo que expresa en función a la corriente de salida del módulo fotovoltaico, mostrado en la siguiente ecuación obtenida del trabajo de (Choulli et al., 2026):

Tabla 3. Coeficientes de comportamiento térmico del panel

Parámetro	Símbolo	Valor
Temperatura nominal de operación (NOCT)	-	43 °C
Coeficiente de potencia	γ	-0.29 %/°C
Coeficiente de voltaje	βV	-0.24 %/°C
Coeficiente de corriente	αI	+0.04 %/°C

$$I = I_{sc}\left(1 - K_{ref}^{\frac{V - V_{oc}}{V_{oc}}}\right) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde I es la corriente de salida del módulo, V es el voltaje terminal, I_{sc} es la corriente de cortocircuito, V_{oc} es el voltaje de circuito abierto y K_{ref} es una constante empírica característica del módulo.

Dependencia con la radiación solar y la temperatura

La influencia de la radiación solar y la temperatura del módulo se incorpora mediante las siguientes relaciones:

$$I_{sc} = I_{sc,ref}\frac{G}{G_{ref}}\left[1 + \alpha_I\left(T - T_{ref}\right)\right] \quad \text{Ec. 5}$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + \beta_V\left(T - T_{ref}\right) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde G es la radiación incidente, T es la temperatura del módulo, G_{ref}=1000 W/m^2 y T_{ref}=25°C corresponden a las condiciones estándar de prueba, mientras que α_I y β_V son los coeficientes de corriente y voltaje.

Sustituyendo las Ecuaciones 5 y 6, en la Ecuación 4 se obtiene el modelo dependiente de radiación y temperatura:

$$I = I_{sc,ref}\,\frac{G}{G_{ref}}\left[1+\alpha_I\left(T-T_{ref}\right)\right]\left(1-K_{ref}^{\frac{V-V_{oc}(T)}{V_{oc}(T)}}\right) \qquad \text{Ec. 7}$$

Determinación de la constante empírica K_{ref}

La constante empírica K_ref se determina a partir del punto de máxima potencia proporcionado por el fabricante del módulo fotovoltaico. Evaluando la Ecuación 4 en el punto (V_mpp,I_mpp) y despejando:

$$I_{mpp} = I_{sc,ref}\left(1-K_{ref}^{\frac{V_{mpp}-V_{oc,ref}}{V_{oc,ref}}}\right) \qquad \text{Ec. 8}$$

$$K_{ref} = \left(1-\frac{I_{mpp}}{I_{sc,ref}}\right)^{\frac{V_{oc,ref}}{V_{mpp}-V_{oc,ref}}} \qquad \text{Ec. 9}$$

Resultados

Comportamiento I-V del módulo

La Figura 2 permite visualizar el comportamiento de la instalación bajo diferentes condiciones, mientras que la Figura 3 permite visualizar que los puntos más altos de cada curva se encuentran en los de máxima potencia (MPPT).

En la Figura 3 se muestra la generación de energía. Aunque son el mismo tipo de panel, el recurso solar es mayor en Mazatán, como se muestra en la Tabla 2, y ello se refleja directamente en su generación. A pesar que existe una diferencia de temperaturas en el mes de diciembre, el efecto por radiación es mucho

mayor que las pérdidas que se producen cuando la temperatura ambiente aumenta en ambos casos. Resultando con una mayor generación de energía en Mazatán que en Jojutla para una misma cantidad de paneles.

Conclusiones

En este trabajo, se presentó el dimensionamiento y análisis comparativo de un sistema fotovoltaico interconectado a red para dos ubicaciones de México: Jojutla, Morelos y Mazatán, Chiapas. El estudio integró el análisis del recurso solar, el efecto de la temperatura ambiente, el modelado térmico del módulo fotovoltaico y el diseño eléctrico del sistema, empleando un módulo Trina Solar de 510 Wp y un microinversor APSY600B. A partir del cuadro de cargas, se determinó una demanda energética diaria de 6.17 kWh. El recurso solar disponible permitió estimar horas sol pico de 4.79 h para Jojutla y 5.03 h para Mazatán, lo que condujo a una potencia fotovoltaica requerida de 1.29 kW y 1.23 kW,

Figura 2. Características P-V del módulo Trina Solar para diferentes niveles de radiación solar

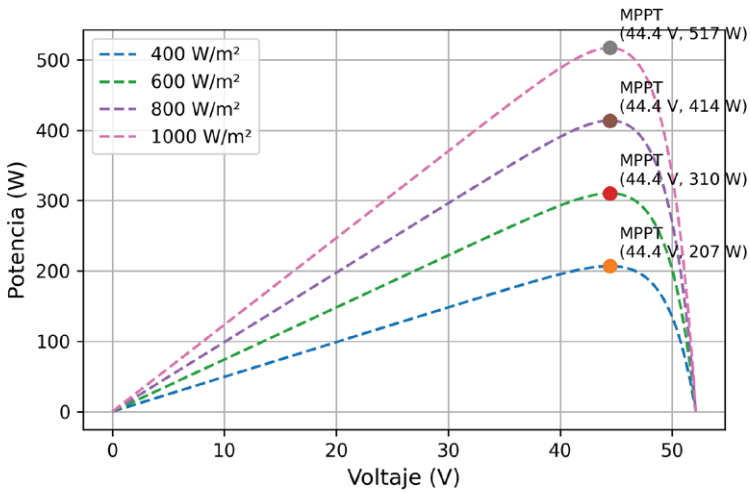


Figura 3. Comparación entre la generación y la salida del inversor considerando la eficiencia en Jojutla

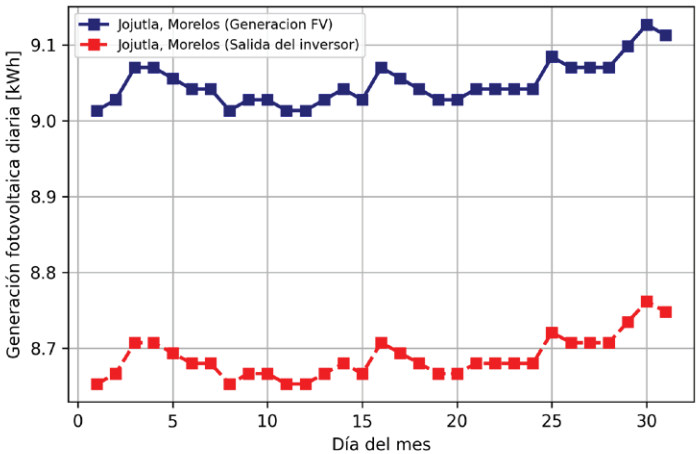


Figura 4. Comparación entre la generación y la salida del inversor considerando la eficiencia en Mazatán

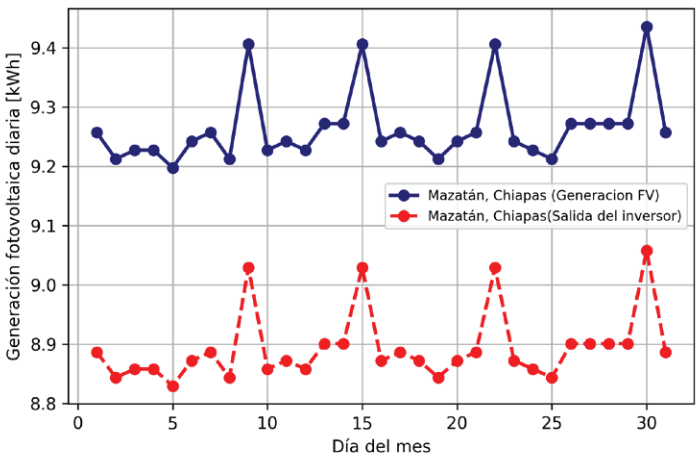


Tabla 4. Resumen final del diseño del sistema fotovoltaico interconectado a red para las localidades de estudio

Parámetro	Jojutla, Morelos	Mazatán, Chiapas
Potencia FV requerida (kW)	1.29	
Número de módulos	4	
Tipo de módulo	Trina Solar Vertex 510 Wp	
Potencia FV instalada (kWp)	2.04	
Tipo de inversor	Microinversor APS Y600B	
Potencia AC máxima (VA)	750	
Voltaje nominal AC (V)	120	
Eficiencia máxima del inversor	96 %	
Generación anual estimada (kWh/año)	3565	3750
Temperatura ambiente máxima (°C)	41	35
Calibre del conductor AC	AWG 12 Cu	
Corriente de diseño (A)	7.81	
Caída de tensión (%)	1.36	
Interruptor general AC	15 A	
Tipo de canalización	PVC pesado 3/4”	
Longitud al punto de interconexión (m)	20	

respectivamente. Considerando aspectos de los requisitos del inversor (su operación), se seleccionó un arreglo de cuatro módulos fotovoltaicos, resultando en una potencia instalada de 2.04 kWp para ambas localidades. El análisis térmico mostró que la ubicación de Mazatán presenta un mayor recurso solar, y sus temperaturas ambientales más elevadas reducen la potencia efectiva del módulo fotovoltaico. No obstante, el sistema propuesto genera mayor energía diaria y anual en Mazatán debido a su mayor irradiación promedio, alcanzando aproximadamente 10.27 kWh/día, en comparación con los 9.77 kWh/día obtenidos en Jojutla. Desde el punto de vista eléctrico, el diseño del sistema cumple con los criterios de seguridad y desempeño establecidos por la normativa vigente NOM-001(Secretaría de Energía, 2012). La caída de tensión se mantuvo por debajo del 3 %; además, se seleccionó un conductor de cobre calibre AWG 12, adecuado para las condiciones térmicas de ambas localidades, y se dimensionó un interruptor general de 15 A para la interconexión a red. Asimismo, la canalización en tubería de PVC de servicio pesado de 3/4" garantiza una instalación segura y confiable.

En resumen, los resultados demuestran que el sistema fotovoltaico propuesto es técnicamente viable, que satisface las necesidades energéticas propuestas en la Tabla 1 y cumple con la normativa vigente. Además, es adecuado para ambas localidades, destacando la importancia de considerar el efecto de la temperatura ambiente en el desempeño real de los sistemas fotovoltaicos.

Referencias

Allwyn, R. G., Al-Hinai, A., Al-Abri, R. y Malik, A. (2022). Optimization and techno-economic analysis of PV/battery system for street lighting applications. *Cleaner Engineering and Technology, 8*, 100475. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100475

Angulo Guerrero, R. J. y González Santana, W. J. (2023). Dimensionamiento de generación eléctrica fotovoltaica para abastecer un sistema de iluminación. *Ingeniería y sus Alcances, 7*(17), 265-273. https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v7i17.105

APsystems. (2026). *YC600B datasheet*. https://latam.apsystems.com/

Cáceres, M., Busso, A. J., Vera, L. H., Firman, A., Leiva, G. y Luque, L. (2012). *Sistemas fotovoltaicos conectados a red: estabilidad de los parámetros de la red y sus efectos en la capacidad de generación*. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar y V Conferencia Latino-Americana da ISES, São Paulo, Brasil.

Choulli, I., Elyaqouti, M., Arjdal, E. H., Saadaoui, D., Ben Hmamou, D., Lidaighbi, S., Elhammoudy, A., Abazine, I. y Ydir, B. (2026). An analytical-iterative method for accurate parameter estimation of the single-diode model in photovoltaic modules: Application to monocrystalline and polycrystalline modules under various environmental conditions. *Green Energy and Intelligent Transportation, 5*(1), 100285. https://doi.org/10.1016/j.geits.2025.100285

Cubas, J., Pindado, S. y De Manuel, C. (2014). Explicit expressions for solar panel equivalent circuit parameters based on analytical formulation and the Lambert W-function. *Energies, 7*(7), 4098-4115. https://doi.org/10.3390/en7074098

Khatib, T. y Muhsen, D. H. (2020). Optimal sizing of standalone photovoltaic system using improved performance model and optimization algorithm. *Sustainability, 12*(6), 2233. https://doi.org/10.3390/su12062233.

Khenissi, I., Fakhfakh, M. A., Sellami, R. y Neji, R. (2021). A new approach for optimal sizing of a grid-connected photovoltaic system. *Applied Artificial Intelligence, 35*(15), 1930-1951. https://doi.org/10.1080/08839514.2021.1995233

Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A. y Kalaitzakis, K. (2006). Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. *Solar Energy, 80*(9), 1072-1088. https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.11.002

Li, J., Qin, C., Yang, C., Ai, B. y Zhou, Y. (2023). Extraction of single diode model parameters of solar cells and PV modules by combining an intelligent optimization algorithm with simplified explicit equation based on Lambert W function. *Energies, 16*(14), 5425. https://doi.org/10.3390/en16145425

Marocco, P., Gandiglio, M. y Santarelli, M. (2024). Optimal design of PV-based grid-connected hydrogen production systems. *Journal of Cleaner Production, 434*, 140007.

Mohammed Ridha, H., Gomes, C., Hizam, H. y Ahmadipour, M. (2020). Optimal design of standalone photovoltaic system based on multi-objective particle swarm optimization: a case study of Malaysia. *Processes, 8*(1), 41. https://doi.org/10.3390/pr8010041

National Aeronautics and Space Administration. (2026). *NASA Power Project*. https://power.larc.nasa.gov/

Reshma, V. P. y Padmasali, A. N. (2025). Impact analysis of initial conditions on numerical methods for PV system modeling. *Energy Reports, 27*, 106842. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106842

Secretaría de Energía. (2012). *NOM-001-SEDE-2012: Instalaciones eléctricas (utilización)*. Diario Oficial de la Federación.

Trina Solar. (2026). *Vertex S+ NEG18R.28. Trina Solar*. https://www.trinasolar.com/es/product/VertexS-NEG18R.28

Wei, D., Li, H., Ren, Y., Yao, X., Wang, L. y Jin, K. (2022). Modeling and optimal configuration of a photovoltaic-based hydrogen production system. *Frontiers in Energy Research, 10*, 1004277. https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1004277

Yang, H., Zhou, W., Lu, L. y Fang, Z. (2008). Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm. *Solar Energy, 82*(4), 354-367. https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.005

Zahrawi, A. A. y Aly, A. M. (2024). A review of agrivoltaic systems: Design, applications and challenges. *Sustainability, 16*(18), 8271. https://doi.org/10.3390/su16188271

Zhang, Y., Ma, T., & Yang, H. (2024). A review on capacity sizing and operation strategy of grid-connected photovoltaic battery systems. *Energy and Built Environment, 5*(4), 500–516. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.04.001

Detección y clasificación de fallas en sistemas fotovoltaicos mediante redes neuronales artificiales embebidas en una arquitectura IoT

José Ricardo Castelo Salazar,[a] José Antonio Marbán Salgado,[a*] Jorge Arturo Sandoval Espino,[a] Roberto Alan Beltrán Vargas,[a] Diego Seuret Jiménez[a]

Abstract

The growth of photovoltaic systems has highlighted the need for efficient and low-cost monitoring solutions for early fault detection. Delayed detection can reduce energy production, compromise system reliability, and increase maintenance costs. This work presents an IoT-based system for fault detection and classification in small-scale PV systems, utilizing an artificial neural network embedded in a low-cost microcontroller. The system monitors electrical and environmental variables (voltage, current, irradiance, and temperature), which are locally processed using a feed-forward neural network implemented on an ESP32. The network classifies four operating conditions: normal operation, open circuit, short circuit, and partial shading. Edge-based inference reduces latency and eliminates dependence on cloud computing. Data are transmitted via MQTT and visualized using Node-RED. Experimental validation achieved an accuracy exceeding 98 %, demonstrating the feasibility of the proposed approach.

Keywords: photovoltaic systems, IoT, fault detection, artificial neural networks, TinyML

[a] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[*] Autor de correspondencia: jose_marban@uaem.mx

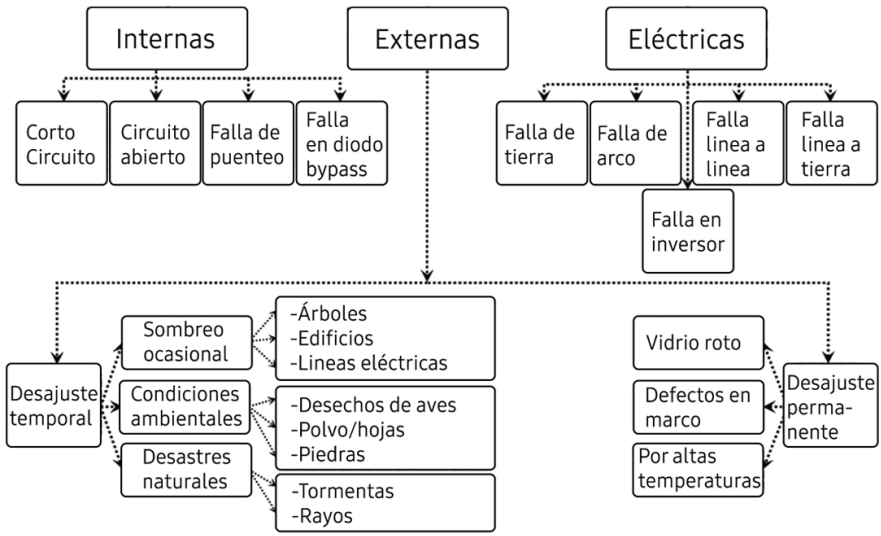
Introducción

La transición energética hacia sistemas más sostenibles ha impulsado el uso de tecnologías basadas en fuentes renovables. La energía fotovoltaica se presenta como una de las alternativas con mayor potencial para la generación distribuida de electricidad (International Energy Agency, 2023; Jäger et al., 2016). En particular, el crecimiento de los sistemas fotovoltaicos (SFV) a pequeña y mediana escala ha generado nuevos retos asociados a su operación, confiabilidad y mantenimiento, especialmente cuando estos sistemas carecen de mecanismos de supervisión adecuados (Mellit et al., 2018; Tina et al., 2016). Cuando la detección de fallas no se realiza de forma oportuna en un SFV, se pueden provocar pérdidas energéticas, riesgos de seguridad y una reducción en la vida útil de los componentes, afectando directamente la rentabilidad del sistema (Lillo-Bravo, 2018; Madeti y Singh, 2017). Una falla en un SFV se define como una condición en la que no se produce la potencia óptima debido a defectos internos, factores ambientales o fallas eléctricas, y puede afectar el lado de corriente continua o de corriente alterna (Madeti y Singh, 2017, Osmani et al., 2023; Hong y Pula, 2022).

En varios trabajos, se han clasificado las fallas en SFV como internas, externas y eléctricas. Las internas ocurren bajo el vidrio protector a nivel de celdas. Las externas se refieren a desajustes temporales o permanentes, como se muestra en la Figura 1. Finalmente, las fallas eléctricas son perturbaciones de entidades físicas (voltaje, corriente, potencia, entre otras) en términos de magnitudes y formas de onda (Osmani et al., 2023).

Típicamente, se incluyen en estos estudios las más comunes como el cortocircuito, el circuito abierto, el sombreado parcial y las fallas de arco (Osmani et al., 2023; Khalil et al., 2020). Las fallas consideradas (cortocircuito, circuito abierto y sombreado parcial), junto con el funcionamiento normal (condiciones normales), fueron seleccionadas por ser las más frecuentes en sistemas fotovoltaicos de pequeña y mediana escala, y por generar variaciones claramente identificables en las variables eléctricas monitoreadas. Esta selección permitió evaluar la viabilidad del modelo embebido bajo un conjunto representativo de escenarios operativos. Además de las fallas consideradas en este trabajo, la

Figura 1. Tipos de fallas en sistemas fotovoltaicos



Fuente: Adaptado de (Osmani et al., 2023).

literatura reporta degradación por puntos calientes, fallas de conexión, degradación inducida por potencial y fallas en inversores, entre otras. Cuando se presentan estas condiciones, se alteran las características eléctricas del sistema, principalmente las que se relacionan con voltaje y corriente, lo que las convierte en indicadores clave para su detección y clasificación (Tina et al., 2016; Hong y Pula, 2022). Esta problemática se ha abordado con diferentes técnicas de detección y clasificación de fallas. Una de las agrupaciones más comunes es en métodos visuales-térmicos y basados en el análisis de variables eléctricas (Mellit et al., 2018; Tsanakas et al., 2016). A diferencia de los métodos visuales y térmicos que implican altos costos e inspecciones fuera de línea (Tsanakas et al., 2016), las técnicas basadas en mediciones eléctricas resultan adecuadas para un monitoreo continuo en tiempo real (Mellit et al., 2018; Hong y Pula, 2022).

En años recientes, se ha incrementado la incorporación de técnicas de inteligencia artificial , demostrando un desempeño superior frente a métodos tradicionales para la detección y clasificación de fallas en SFV (Mellit et al., 2018; Hong y Pula, 2022). En particular, se destacan las redes neuronales artificiales

(ANN), principalmente por su capacidad para modelar relaciones no lineales y adaptarse a entornos dinámicos donde la irradiancia y la temperatura suelen estar variando a través del tiempo (Mellit et al., 2018; Hong y Pula, 2022). Paralelamente, el internet de las cosas (IoT) ha permitido implementar sistemas de monitoreo distribuidos para adquirir, procesar y transmitir información en tiempo real mediante dispositivos de bajo costo (Gubbi et al., 2013). En este contexto, la computación en el borde y el paradigma TinyML se presentan como buenas alternativas para ejecutar modelos de aprendizaje automático directamente en microcontroladores con recursos limitados, reduciendo la latencia, el consumo energético y la dependencia de servicios en la nube (Warden y Situnayake, 2020; Shi et al., 2016).

Teniendo en cuenta este contexto, el objetivo de este capítulo es presentar un sistema IoT para la detección y clasificación de fallas en sistemas fotovoltaicos a pequeña escala, basado en una ANN embebida en un microcontrolador ESP32. El sistema presentado incluye la medición de variables eléctricas y ambientales, la inferencia local a través de una ANN y la visualización en tiempo real a través de herramientas de *software* libre, ofreciendo una solución de bajo costo, escalable y orientada a aplicaciones de computación en el borde.

Materiales y metodología

Sistema de adquisición, procesamiento e infraestructura IoT

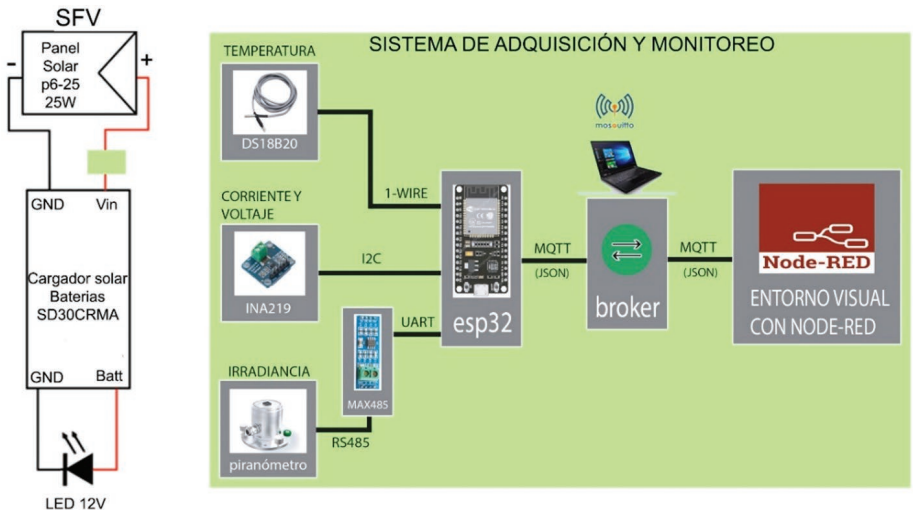
Para el sistema de monitoreo presentado, se seleccionaron cuatro variables relevantes: voltaje, corriente, irradiancia solar y temperatura ambiental. Estas variables han demostrado ser representativas para la detección de fallas eléctricas y ambientales en sistemas fotovoltaicos (Mellit et al., 2018; Madeti y Singh, 2017; Hong y Pula, 2022). Se utilizaron los módulos INA219 y DS18B20 para medir voltaje, corriente y temperatura, junto a un piranómetro RS485 para la irradiancia solar; esta selección de sensores con salida digital permitió minimizar errores asociados a ruido y variaciones durante la transmisión de datos.

Las mediciones se realizaron con un intervalo de muestreo de un segundo, valor que se encuentra dentro del rango recomendado por la norma IEC 61724-1 para el monitoreo de sistemas fotovoltaicos (International Electrotechnical Commission, 2017).

La adquisición de datos, la inferencia de la ANN y la transmisión inalámbrica de la información se realizó con una tarjeta de desarrollo basada en ESP-WROOM-32, seleccionada por su relación costo-beneficio, capacidad de cómputo y conectividad inalámbrica integrada (Espressif Systems, 2023; Prakash et al., 2025).

Para la comunicación se utilizó el protocolo MQTT, ampliamente empleado en aplicaciones IoT por su bajo consumo de ancho de banda y su eficiencia en dispositivos con recursos limitados (OASIS, 2019; Banks y Gupta, 2014). Los datos se transmitieron en formato JSON, facilitando su interpretación y visualización posterior. La supervisión en tiempo real se realizó mediante un panel de monitoreo desarrollado en Node-RED, ejecutado en un servidor local, lo que permitió mantener la privacidad de los datos y evitar la dependencia de servicios en la

Figura 2. Esquema del SFV utilizado y del sistema de monitoreo propuesto



nube (Node-RED, 2024; Blackstock y Lea, 2014). En la Figura 2, se presenta un esquema general del sistema propuesto y el sistema fotovoltaico utilizado.

Red neuronal artificial y diagnóstico de fallas

El diagnóstico de fallas se llevó a cabo mediante la implementación de una ANN *feed-forward* entrenada para clasificar cuatro condiciones de operación del SFV: condiciones normales, circuito abierto, cortocircuito y sombreado parcial. Esta arquitectura fue seleccionada debido a la amplia documentación encontrada en la literatura aplicada en diferentes contextos y, en particular, por su buen desempeño en la clasificación de fallas eléctricas en sistemas fotovoltaicos (Mellit et al., 2018; Hong y Pula, 2022).

La ANN utiliza cuatro neuronas de entrada correspondientes a las variables medidas, una capa oculta de dieciséis neuronas con función de activación ReLU y una capa de salida con función Softmax para la clasificación multiclase (Goodfellow et al., 2016; Haykin, 2009). El modelo fue entrenado previamente en un entorno de desarrollo utilizando Python y bibliotecas de aprendizaje automático, y posteriormente embebido de forma explícita en el microcontrolador ESP32 mediante la codificación directa de los pesos, sesgos y parámetros de normalización.

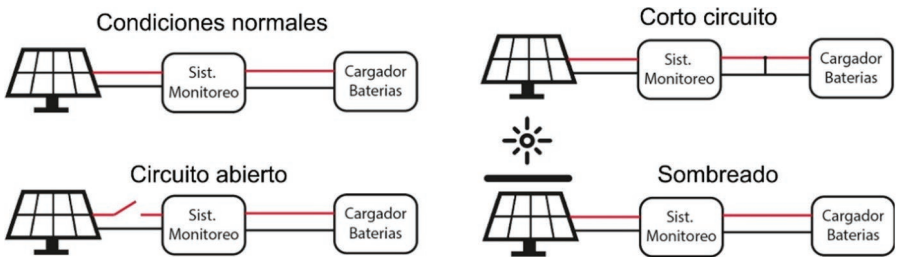
Protocolo experimental y generación del conjunto de datos

La validación experimental se realizó en un sistema fotovoltaico a pequeña escala, conformado por un panel solar de 25 W conectado a una carga resistiva. Las fallas se simularon de manera controlada como se muestra en la Figura 3: el sombreado parcial se generó cubriendo el panel y el sensor de irradiancia ; el circuito abierto se produjo desconectando la salida del panel, y el cortocircuito se obtuvo uniendo las terminales de entrada de la carga. Estas fallas fueron consideradas debido a su criticidad , siendo el cortocircuito y circuito abierto clasificados como fallas agudas que detienen la continuidad del servicio, y el

sombreado, por su potencial para generar puntos calientes y daños estructurales permanentes (Khalil et al., 2020).

Durante un periodo de doce días, se adquirieron muestras bajo las diferentes condiciones de operación, registrando las variables medidas, etiquetando la clase correspondiente a cada una de las fallas, así como a las condiciones normales de funcionamiento. Este conjunto de datos se utilizó para entrenar, validar y evaluar el modelo de ANN.

Figura 3. Condiciones de operación consideradas para la clasificación



Resultados

Desempeño del modelo de clasificación

El modelo de ANN implementado para la detección y clasificación de fallas en el SFV fue evaluado mediante un conjunto de datos independiente al de entrenamiento. La red logró una precisión global de 98.64 % en la identificación de las cuatro condiciones consideradas: condiciones normales, circuito abierto, cortocircuito y sombreado parcial.

El análisis por clase registró métricas de precisión, *recall* y *F1-score*, que indican la separación entre las distintas condiciones de operación. Las fallas eléctricas de circuito abierto y cortocircuito obtuvieron los valores más altos de clasificación, mientras que las de sombreado parcial y condiciones normales presentaron una mayor cantidad de muestras no correspondientes. La matriz de confusión (Figura 4) muestra que la mayoría de las predicciones correctas se

concentran en la diagonal principal, con un número reducido de clasificaciones erróneas entre clases, principalmente en transiciones asociadas a condiciones ambientales variables.

Estos resultados son coherentes con lo reportado en la literatura para sistemas fotovoltaicos bajo condiciones controladas (Mellit et al., 2018; Hong y Pula, 2022).

Figura 4. Matriz de confusión del modelo de RNA utilizado

Etiqueta	Clases
0	Condiciones normales
1	Circuito abierto
2	Corto circuito
3	Sombreado

Etiqueta	0	1	2	3
0	22600	0	64	745
1	0	15185	3	0
2	0	0	17983	0
3	192	0	0	17283

El resumen cuantitativo del desempeño del modelo se presenta en la Tabla 1, donde se incluyen las métricas de evaluación por clase, permitiendo una comparación directa del comportamiento del clasificador para cada condición analizada.

Tabla 1. Reporte de clasificación del modelo de clasificación

Clase	Etiqueta	Precisión	Recall	F1-score	Cantidad de muestras
Condiciones normales	0	0.99	0.97	0.98	23409
Circuito abierto	1	1	1	1	15188
Corto circuito	2	1	1	1	17983
Sombreado	3	0.96	0.99	0.97	17475

Resultados del sistema IoT en tiempo real

Tras la validación del modelo, la ANN fue embebida en el microcontrolador ESP32 y evaluada en operación en tiempo real dentro del sistema IoT propuesto. Este realizó la adquisición de variables eléctricas y ambientales, la inferencia local y la transmisión de datos con un intervalo de actualización de un segundo. En la Figura 5, se presentan siete muestras (condiciones normales) medidas a diferentes horas, junto a una gráfica con las cuatro variables obtenidas durante el día.

Figura 5. Ejemplos de valores de mediciones correspondientes a las variables eléctricas y ambientales

Hora	voltaje (V)	corriente (mA)	temperatura (°C)	irradiancia (W/m2)
06:30:58	16.76	3.5	18.19	15
09:54:10	19.45	77.6	42.19	1017
12:54:49	18.94	79.3	49	1422
14:59:32	18.82	79.7	47.62	1000
15:48:47	18.76	79.9	46.31	852
17:21:09	16.94	69.2	34.31	103
18:15:20	16.9	8.5	31.06	40

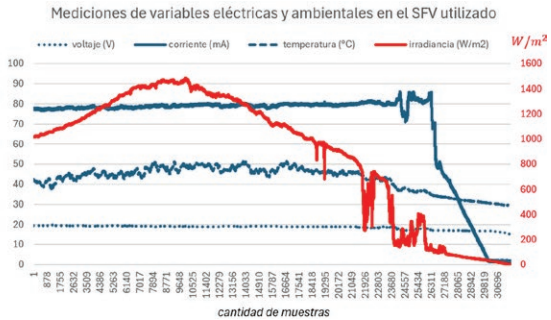


Figura 6. *Dashboard* implementado en Node-RED para el monitoreo del sistema fotovoltaico



Los valores de las variables registrados a cada instante y los resultados de la clasificación (clases inferidas) fueron enviados mediante el protocolo MQTT y visualizados en un panel de monitoreo desarrollado en Node-RED. La Figura 6 muestra una captura del *dashboard*, donde se observa la actualización continua de las variables y la identificación del estado de operación del sistema fotovoltaico.

Conclusiones

En este capítulo se presentó un sistema IoT para la detección y clasificación de fallas en sistemas fotovoltaicos a pequeña escala, basado en una ANN embebida en un microcontrolador ESP32. Los resultados obtenidos permiten concluir que es posible integrar la adquisición de variables eléctricas y ambientales, la inferencia local mediante una ANN y la visualización en tiempo real dentro de una arquitectura compacta y de bajo costo, de manera efectiva.

El modelo de red neuronal artificial implementado obtuvo un desempeño robusto en la clasificación de cuatro condiciones de operación relevantes en sistemas fotovoltaicos: condiciones normales, circuito abierto, cortocircuito y sombreado parcial, alcanzando una precisión global superior al 98 %. Estos resultados confirman que arquitecturas *feed-forward* simples, a pesar de su sencillez, son suficientes para la detección de fallas eléctricas básicas cuando se realiza una selección adecuada de las variables, incluso bajo restricciones computacionales propias de microcontroladores.

La ejecución de la inferencia directamente en el ESP32 deja una buena evidencia de la viabilidad del paradigma TinyML para aplicaciones de monitoreo fotovoltaico en tiempo real, eliminando la necesidad de equipos más costosos o de procesamiento en la nube, además que reduce la latencia del sistema. Por otro lado, el uso de protocolos y herramientas de *software* libre, como MQTT y Node-RED, permitió implementar una infraestructura de monitoreo flexible, escalable y orientada a la computación en el borde, manteniendo la privacidad de los datos y reduciendo los costos de implementación.

Los resultados obtenidos son satisfactorios; sin embargo, es importante mencionar que el sistema fue entrenado y validado bajo condiciones controladas,

además que se utilizó un sistema fotovoltaico a pequeña escala. De tal forma que el desempeño reportado debe considerarse como una prueba de concepto funcional. Para aplicaciones en entornos reales, particularmente en sistemas fotovoltaicos domésticos o comerciales con microinversores, es necesario ampliar el conjunto de datos de entrenamiento, incorporar fallas adicionales y adaptar la instrumentación de medición a niveles de potencia más elevados.

En conjunto, los resultados presentados demuestran que la combinación de redes neuronales embebidas, IoT y computación en el borde, constituye una alternativa viable para el diagnóstico de fallas en sistemas fotovoltaicos, con potencial para ser integrada en soluciones de monitoreo accesibles y orientadas a la generación distribuida.

Referencias

Banks, A. y Gupta, R. (Eds.). (2014). *MQTT Version 3.1.1*. OASIS. https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html

Blackstock, M. y Lea, R. (2014). Toward a distributed data flow platform for the Web of Things (distributed Node-RED). *Proceedings of the IEEE International Conference on Web of Things, 14*, 34-39. https://doi.org/10.1145/2684432.2684439

Espressif Systems. (2023). *ESP32 Series Datasheet Version 5.2*. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

Goodfellow, I., Bengio, Y. y Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press. https://www.deeplearningbook.org/

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. y Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems, 29*(7), 1645-1660. https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010

Haykin, S. (2009). *Neural networks and learning machines* (3.ª ed.). Pearson Education.

Hong, Y.-Y. y Pula, R. A. (2022). Methods of photovoltaic fault detection and classification: A review. *Energy Reports, 8*, 5898-5929. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.043

International Electrotechnical Commission. (2017). *IEC 61724-1: Photovoltaic System Performance - Part 1: Monitoring*. https://webstore.iec.ch/en/publication/70170

International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023*. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

Jäger, K., Isabella, O., Smets, A. H. M., van Swaaij, R. A. C. M. M. y Zeman, M. (2016). *Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems*. UIT Cambridge.

Khalil, I. U., Ul-Haq, A., Mahmoud, Y., Jalal, M., Aamir, M., Ahsan, M. U. y Mehmood, K. (2020). Comparative analysis of photovoltaic faults and performance evaluation of its detection techniques. *IEEE Access, 8*, 26676-26700. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970531

Lillo-Bravo, I., González-Martínez, P., Larrañeta, M. y Guasumba-Codena, J. (2018). Impact of energy losses due to failures on photovoltaic plant energy balance. *Energies, 11*(2), 363. https://doi.org/10.3390/en11020363

Madeti, S. R. y Singh, S. N. (2017). A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system. *Solar Energy, 158*, 161-185. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.069

Mellit, A., Tina, G. M. y Kalogirou, S. A. (2018). Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91*, 1-17. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.062

Node-RED. (2024). *Node-RED Documentation*. OpenJS Foundation. https://nodered.org/docs/

OASIS. (2019). *MQTT Version 5.0*. https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html

Osmani, K., Haddad, A., Lemenand, T., Castanier, B., Alkhedher, M. y Ramadan, M. (2023). A critical review of PV systems' faults with the relevant detection methods. *Energy Nexus, 12*, 100257. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100257

Prakash, S. S., Usha, R., Karuppiah, N., Saravanan, S., Kalaiyarasi, M. y Karunanithi, K. (2025). *IoT based smart home and security system employing the ESP32 microcontroller*. 2nd International Conference on Renewable Energy, Green Computing and Sustainable Development, E3S Web of Conferences 616, 02004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561602004

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y. y Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal, 3*(5), 637-646. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198

Tina, G. M., Cosentino, F. y Ventura, C. (2016). Monitoring and diagnostics of photovoltaic power plants. En A. Sayigh (Ed.), *Renewable Energy in the Service of Mankind: Vol. 2* (pp. 505-516). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18215-5_45

Tsanakas, J. A., Ha, L. y Buerhop, C. (2016). Faults and infrared thermographic diagnosis in operating c-Si photovoltaic modules: A review of research and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62*, 695-709. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.079

Warden, P. y Situnayake, D. (2020). *TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers*. O'Reilly Media. https://www.oreilly.com/library/view/tinyml/9781492052036/

Design of a test bench as a prototype of a falling film heat exchanger to evaluate wetting performance in enhanced-texture tubes

Javier Delgado-Gonzaga,[a*] Wilfrido Rivera,[b] David Juárez-Romero,[c] Alfredo Gil Velasco,[a] Miriam Navarrete Procopio,[d] Marcos Xavier Hernández Teodoro,[c] Miguel Israel Heredia García[e]

Abstract

In this work, the first stage in the development of a prototype heat exchanger intended for application in an absorption heat transformer (AHT) is presented. The AHT, which operates with the LiBr -H_2O working pair, has a thermal capacity of 2 kW and employs a falling film heat transfer mechanism in each of its main components. In this type of heat exchanger, wetting efficiency constitutes a key factor influencing overall system performance. Within this framework, the present study focuses on the definition and analysis of the thermal design characteristics of the prototype. To this end, typical operating conditions for this class of systems, the thermal capacity of the AHT, and the specific requirements of the LiBr -H_2O working mixture are considered. In addition, the principal dimensions of the equipment are established, as these are essential to ensure proper and representative operation. Therefore, this work is relevant because it defines the thermal design characteristics of a prototype heat exchanger for absorption systems, in which wetting efficiency is critical. The prototype will

[a] Ingeniería en Sistemas Electrónicos, Universidad Politécnica del Estado de Morelos.
[b] Instituto en Energías Renovables, UNAM.
[c] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[d] Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM.
[e] Proplaneta S.A. de C.V.
[*] Corresponding author: javier.delgado@uaem.mx

enable the analysis of falling film heat transfer under representative operating conditions.

Keywords: falling film heat exchanger, design and manufacturing of a heat exchanger, test bench, absorption heat transformer, heat transfer.

Introduction

The rapid expansion of the global population is driving a growing demand for goods and services, placing significant pressure on energy and water resources, a situation further intensified by climate change linked to human activity. In this context, the development of technologies aimed at mitigating these challenges has become essential. Over the past few decades, absorption heat pumps (AHPs) have attracted significant attention, as they can utilize low-grade thermal energy to generate heating or cooling while requiring minimal electrical input and posing a lower environmental impact. Although AHPs have higher investment costs than conventional heat pumps, studies show they can be competitive when waste heat is available, and current research mainly focuses on improving their performance through heat exchanger design and flow characteristics. Numerous studies have analyzed the benefits and improvement potential of AHPs. Although their main drawback is the higher investment cost compared to conventional compression heat pumps, AHPs can be competitive when low-cost heat sources, such as industrial waste heat, are available. Research on AHPs using falling film heat exchangers mainly focuses on geometry, wetting efficiency, and flow regime effects. Kim et al. (2016) developed a numerical and experimental study of a falling film absorber on corrugated vertical plates for absorption refrigeration systems using the LiBr -H_2O working pair. They analyzed how surface roughness and flow distribution influence heat and mass transfer, concluding that corrugated surfaces improve wettability and significantly increase the absorption rate. Kyung et al. (2007) analyzed the performance of a horizontal smooth-tube LiBr-H_2O absorber by combining a numerical model with experimental validation. Their study demonstrated that accurate prediction of absorber performance strongly depends on the

appropriate estimation of mass diffusivity and heat and mass transfer processes within the falling liquid film. In addition, they analyzed the influence of absorber capacity, tube bundle configuration, and solution-side heat transfer on the overall absorption performance, providing a validated framework for evaluating and improving horizontal tube absorbers. Medrano et al. (2003) developed a mathematical model to analyze coupled heat and mass transfer in a vertical falling-film absorber operating with LiBr-H_2O. Their study examined the influence of non-condensable gases on the absorption process and demonstrated that absorber performance is strongly affected by mass transfer resistance and local transport conditions within the liquid film. The proposed model provides a useful framework for predicting absorber behavior and evaluating design and operating conditions in absorption heat pump systems. Park et al. (2003) experimentally investigated the influence of micro-scale hatched tube surfaces on falling-film absorption heat transfer in a LiBr-H_2O absorber. Their results showed that surface microstructuring substantially enhanced the absorption heat transfer performance compared with smooth tubes. Juárez Romero et al. (2023) theoretically and experimentally studied the performance of a sandblast surface evaporator applied to an absorption heat transformer. The authors reported that heat transfer is improved compared to a smooth surface evaporator. The authors also mentioned that convective heat transfer benefits under optimal Reynolds number conditions. There are also studies that investigate heat transfer based on the analysis of wetting efficiency in falling film configurations (Álvarez & Bourouis, 2021; Gonda et al., 2014; Yoon et al., 2008). However, there are no reported studies evaluating wetting efficiency through a test bench capable of emulating the characteristic operating conditions of an absorption cycle, particularly under vacuum pressure conditions when operating with the LiBr -H_2O working pair.

In this study, the aim is to design, manufacture and subsequently evaluate the performance of a test bench as a prototype of a heat exchanger for an absorption thermal transformer (AHT). The AHT is a *type* of heat pump capable of upgrading low-grade thermal energy to a higher temperature level suitable for secondary processes, such as water desalination. The heat exchangers of the

AHT have a thermal capacity of 2 kW and operate under a falling film configuration. In this *type* of exchanger, proper wetting efficiency along the external surface of the tubes—over which the LiBr -H_2O falling film flows—is essential.

Therefore, this work presents the initial stage of the project, which involves the design, construction, and characterization of the test bench. The design is based on typical operating conditions, the AHT thermal capacity, and the requirements of the LiBr–H_2O working pair.

Materials and methods

Description

The test bench is a sealed metallic device that operates as a falling film heat exchanger. It was manufactured by Proplaneta S.A. de C.V., located in Huitzilac, Morelos, Mexico. The design criteria and main characteristics are presented below, together with the instrumentation implemented for the measurement and recording of thermodynamic variables.

Design criteria

The test bench was designed to emulate the characteristic operating conditions of a heat exchanger applied to an absorption thermal transformer (ATT). The studies reported by Álvarez & Bourouis (2021), Gonda et al. (2014), and Yoon et al. (2008) were selected as the basis for the design, as they are closely aligned with the objectives established in this work.

The test bench was conceived under an integrated approach that combines structural strength, experimental accuracy, and ease of maintenance. A vertical heat exchanger, as shown in Figure 1, was selected as the most suitable configuration to maximize heat transfer area.

The tubes inside the unit—through which heating water flows when the test bench operates as a generator, or cooling water when it operates as an absorber—are arranged horizontally, one above the other (ten tubes in total). This

tube bundle is irrigated by a droplet distributor located at the upper central section to ensure even film distribution. The test bench is designed to allow easy assembly and disassembly of horizontal tube bundles with different surface textures to evaluate their heat transfer performance. Figure 2 shows a technical drawing and an image of the horizontal tube bundle.

The top section of the test bench was sealed with a welded cover and is equipped with couplings for the installation of measurement instruments. At the lower section, a welded cover with an orifice was incorporated to serve as a drain. The test bench also features lateral connections for the installation of temperature sensors to monitor thermal levels at different positions.

Figure 1. Vertical configuration of the test bench

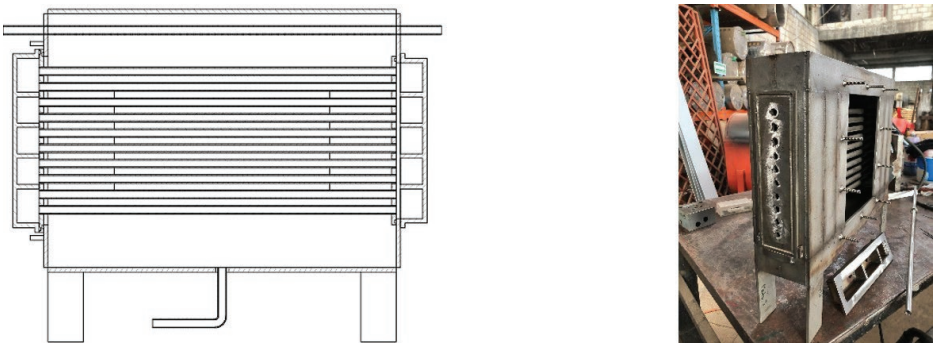


Figure 2. Horizontal tube bundle



Design characteristics

The casing of the test bench was manufactured from AISI 316L stainless steel, selected for its high corrosion resistance and durability. The frame incorporates strategically positioned polycarbonate sight windows: a front window that facilitates the entry of natural light to observe phenomena such as droplet formation and falling behavior, and a larger rear window that provides a wide and detailed viewing angle. This configuration ensures optimal visibility and analytical conditions during experimental operation.

To guarantee hermetic sealing and operator safety, the material and thickness of the sight windows were selected based on deformation simulations conducted over the pressure range at which the test bench is intended to operate. The simulations were performed using Autodesk Inventor and Consol *software*. Figure 3 presents a portion of the simulation analysis. The sight windows are made of high-density polycarbonate with a thickness of 13 mm.

Internally, the system consists of a bundle of ten tubes arranged with a uniform spacing of 4 mm. Table 1 shows the test bench design specifications.

Type T thermocouples were used to monitor and record temperatures at different points of interest within the test bench. A Cole-Parmer® pressure transducer was installed to measure the system pressure. The flowmeters used for monitoring and recording flow rates are manufactured by Cole-Parmer® and

Figure 3. Structural simulation performed in Consol for the analysis of deformation in the sight windows

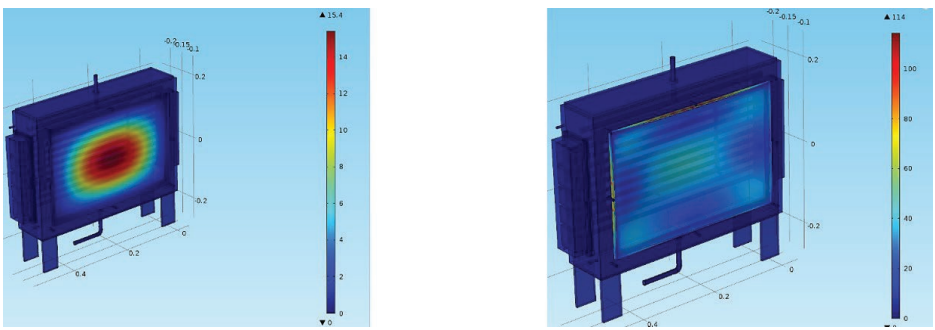


Table 1. Mechanical design specifications

Parameter	Value
Number of tubes [-]	10
Internal tube diameter [m]	0.0127
Wall thickness [m]	0.0063
Tube material [-]	AISI 316L stainless steel
Tube length [m]	0.50
Thermal conductivity [W/mK]	16.30
Type of joint [-]	Detachable flange and couplings

constructed from AISI 316 stainless steel, borosilicate glass, and Viton® seals to prevent corrosion. For temperature and pressure monitoring and data acquisition, a data acquisition system equipped with a multiplexer card with a capacity of 20 input channels for millivolt (mV) signals was employed. A PEDROLLO® centrifugal pump with a power rating of 764 W was installed to circulate the heating water. For the flow of the absorbent mixture, a Cole-Parmer® positive displacement pump with a power rating of 0.07 hp was used.

Figure 4. Instrumented Test Bench



Conclusions

This work describes the design of a test bench built as a prototype of a falling film heat exchanger, developed to emulate the actual operating conditions of an absorption thermal transformer operating with the LiBr -H_2O working pair. The detailed description and the thermal, structural, and instrumentation criteria ensure appropriate conditions of safety, hermetic sealing, and experimental accuracy, thereby enabling the evaluation of wetting efficiency and its influence on heat transfer performance.

The presentation of this design is particularly relevant because it establishes the foundation for the optimization of surface geometries and configurations aimed at improving the performance of absorption systems. This helps develop more efficient components and supports the advancement of energy-efficient technologies.

References

Álvarez, M. E., & Bourouis, M. (2021). Modelling of Coupled Heat and Mass Transfer in a Water-Cooled Falling-Film Absorber Working with an Aqueous Alkaline Nitrate Solution. *Energies, 14*(7), 1804. https://doi.org/10.3390/en14071804

Gonda, A., Lancereau, P., Bandelier, P., Luo, L., Fan, Y., & Benezech, S. (2014). Water falling film evaporation on a corrugated plate. *International Journal of Thermal Sciences, 81*, 29-37. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.02.010

Kim, J., Lee, S., & Park, C. (2016). Heat and mass transfer characteristics of a falling film absorber on corrugated vertical plates using LiBr-H_2O solution. *Applied Thermal Engineering, 103*, 1120-1130. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.018

Kyung, I., Herold, K. E., & Kang, Y. T. (2007). Experimental verification of H_2O/LiBr absorber bundle performance with smooth horizontal

tubes. *International Journal of Refrigeration, 30*(4), 582-590. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.11.005

Medrano, M., Bourouis, M., Perez-Blanco, H., & Coronas, A. (2003). A simple model for falling film absorption on vertical tubes in the presence of non-absorbables. *International Journal of Refrigeration, 26*(1), 108–116. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00015-4

Park, C. W., Kim, S. S., Cho, H. C., & Kang, Y. T. (2003). Experimental correlation of falling film absorption heat transfer in micro-scale hatched tubes. *International Journal of Refrigeration, 26*(7), 758–763. https://doi.org/10.1016/S0140-7007(03)00069-0

Romero, D., Rivera, W., Canela Sánchez, I. J., Ortega Mojica, N. I., Huicochea, A., & Delgado Gonzaga, J. (2023). Evaluation of a rough-surface evaporator applied to an absorption heat transformer for water desalination. *International Journal of Chemical Reactor Engineering, 21*(4), 537-547. https:// doi.org/10.1515/ijcre-2022-0113

Yoon, J. I., Phan, T. T., Moon, C. G., Lee, H. S., & Jeong, S. K. (2008). Heat and mass transfer characteristics of a horizontal tube falling film absorber with small diameter tubes. *Heat and Mass Transfer, 44*, 437-444. https://doi.org/10.1007/s00231-007-0261-8

Desarrollo de un sistema domótico a escala controlado por movimientos oculares como tecnología de asistencia para personas con síndrome de enclaustramiento

Luis Adrian Lara Ocampo,[a] Diego Hernández Cabrera,[a] Héctor Miguel Buenabad Arias,[a*] Antonio Isaias Martínez Santos,[a] Miguel Angel Basurto Pensado,[a] Daily Quintana Fuentes,[a] Javier Emmanuel Rodríguez Degante,[a] Jonathan Villanueva Tavira,[b] Andrés Blanco Ortega[b]

Abstract

This article presents the development and implementation of a scale model home automation system controlled by eye movements using computer vision techniques. The system integrates a programme using convolutional neural networks that allows blinks to be interpreted as control signals. These signals interact with a graphical interface developed in LabVIEW, which communicates with an Arduino-based embedded system responsible for executing home automation actions such as lighting, ventilation, alarms and access control using actuators. The prototype was evaluated through pilot tests with healthy users, focusing on ease of use and human-system interaction. The qualitative results show the viability of the system as an assistive technology for people with locked-in syndrome.

Keywords: computer vision, biomedical engineering, locked-in syndrome, home automation, embedded system.

[a] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[b] Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tecnológico Nacional de México.
[*] Autor de correspondencia: hector.buenabad@uaem.mx

Introducción

El síndrome de enclaustramiento (*locked-in syndrome*, LIS por sus siglas en inglés) es una patología que se caracteriza por tetraplejia, con preservación de los movimientos oculares verticales y de las funciones cognitivas (Racca Velásquez et al., 2025; Ramos et al., 2011). Las personas que lo padecen enfrentan múltiples desafíos debido a que no solo se ven afectadas sus capacidades motoras, sino también la comunicación y participación social. Actualmente, no existe una cura para este síndrome; sin embargo, diversas intervenciones permiten controlar los síntomas y mejorar la calidad de vida del paciente. Estas estrategias se centran en la rehabilitación neurológica, el soporte vital y el desarrollo de métodos de comunicación que faciliten la interacción del paciente con su entorno (Riveros et al., 2014; Roosemberg et al., 2024).

En este contexto, el desarrollo tecnológico resulta fundamental para apoyar a las personas con LIS, ya que el uso de tecnologías de asistencia puede contribuir a recuperar cierto grado de autonomía, particularmente en la comunicación y en la realización de actividades cotidianas (Ardiles Sotomayor, 2017; Collaguazo Angamarca, 2024). En paralelo, el crecimiento de las tecnologías del internet de las cosas (IoT) ha aumentado significativamente durante la última década, impulsando la creación de entornos inteligentes mediante el uso de la domótica (Amaya Fariño et al., 2020; Vásquez Arboleda y Tixi Ramos, 2023).

Por otra parte, la visión artificial es una disciplina científica y tecnológica que permite a las máquinas percibir su entorno, extraer información a partir de imágenes digitales y ejecutar tareas específicas con base en su análisis. Su evolución reciente ha permitido su aplicación en diversos ámbitos, desde el sector industrial hasta la biomedicina (Vásquez Arboleda y Tixi Ramos, 2023; Avila-Tomás et al., 2020; Mc Cann y Stephen, 2024). En particular, la automatización de tareas en combinación con sistemas domóticos representa una alternativa prometedora para mejorar la calidad de vida de personas con limitaciones físicas, al fomentar su autonomía y disminuir se dependencia del entorno familiar (Collaguazo Angamarca, 2024).

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un prototipo a escala que utilice la visión artificial como medio para interpretar señales del entorno, específicamente el movimiento ocular del paciente. Este prototipo busca favorecer la autonomía de personas con LIS al proporcionar una herramienta que les permita ejecutar tareas domésticas que, de otro modo, requerirían asistencia externa. Dichas tareas se implementarán mediante un *software* de programación visual, el cual ofrece una interfaz gráfica para el control de *hardware*, incluyendo actuadores, dispositivos de control y sistemas de iluminación, a través de un sistema embebido (Morán Lino et al., 2020; Meléndez Pertuz, 2018).

Materiales y metodología

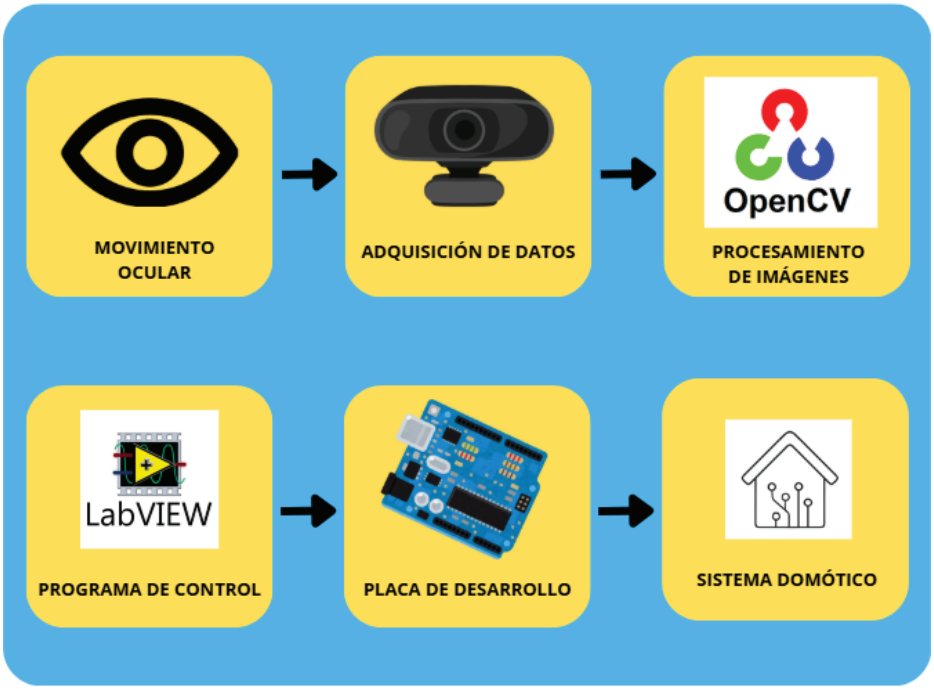
En esta sección se describen los materiales y métodos empleados en el desarrollo del presente estudio. En la etapa de *hardware*, se utilizó un microcontrolador tipo Arduino como unidad de control del sistema. Para el procesamiento y control en *software*, se empleó el entorno de programación visual LabVIEW, en conjunto con el lenguaje de programación Python y el uso de la biblioteca OpenCV, utilizada para la implementación de los algoritmos de visión computacional.

La Figura 1 presenta la metodología propuesta, organizada en una secuencia estructurada de etapas, las cuales se describen detalladamente en los apartados subsecuentes.

Herramientas de software *y* hardware

Para la implementación del sistema se emplearon diversos recursos de *hardware*, entre los que se incluyen: una cámara con resolución de 640 × 480640 \times 480640 × 480 píxeles (SD/VGA); un equipo de cómputo portátil con procesador Intel Core i5, 8 GB de memoria RAM, tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 2050 y unidad de estado sólido (SSD) de 480 GB; una placa de desarrollo basada en la plataforma Arduino; un soporte tipo trípode para la cámara; una maqueta a escala de una vivienda de dos niveles, construida en madera mediante corte CNC; así como distintos actuadores e indicadores electrónicos.

Figura 1. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema



En la etapa de *software* se utilizaron las siguientes herramientas: el entorno de desarrollo IDLE para Python versión 3.10; la biblioteca OpenCV versión 4.10 para el procesamiento de imágenes; y el *software* LabVIEW versión 2022, complementado con un *toolkit* especializado para la integración y control del sistema.

Movimiento ocular

El movimiento ocular en pacientes con LIS constituye una de las principales vías de interacción y comunicación, debido a las severas limitaciones motoras que presentan. En este trabajo, dicha capacidad se emplea como fuente de señales de control, permitiendo la navegación y selección de opciones dentro de la interfaz del sistema.

Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se emplea una cámara web destinada a la captura de imágenes faciales del usuario. Con el fin de garantizar condiciones adecuadas de captura, la cámara se coloca sobre un soporte ajustable que permite alinearla a la altura del rostro, asegurando un encuadre frontal estable. La conexión con el equipo de cómputo se realiza mediante una interfaz USB compatible con el estándar UVC, lo que permite la adquisición de video en tiempo real para su posterior procesamiento.

Procesamiento de imágenes

Las imágenes adquiridas se procesan mediante un código desarrollado en Python, apoyado en la librería OpenCV y en modelos de redes neuronales convolucionales (CNN) para la detección y el mapeo de puntos clave en el rostro. A partir de estos puntos, se parametrizan los movimientos oculares mediante un análisis secuencial, con el objetivo de reducir errores en su identificación. Una vez clasificado el movimiento, el sistema ejecuta una etapa de toma de decisiones para determinar la acción correspondiente.

Programa de control

El control de los periféricos se implementa mediante el *software* de programación visual LabVIEW, en el cual se diseñó una interfaz gráfica que incluye controles para alarmas, iluminación, ventilación, dispositivos electrónicos, puertas y ventanas. La interfaz es controlada mediante un programa Python, el cual, a partir de los datos adquiridos mediante visión artificial permite accionar los controles. Adicionalmente, el sistema establece una comunicación con la placa Arduino mediante un puerto serie.

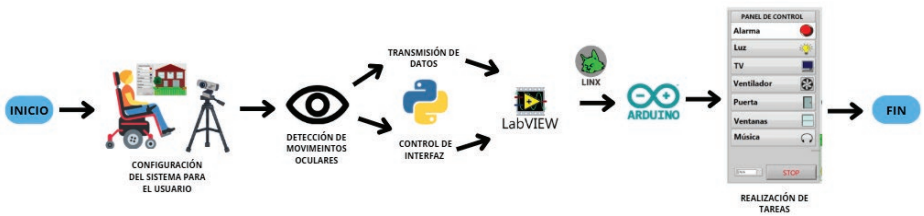
Placa de desarrollo

La placa de desarrollo basada en Arduino recibe las señales provenientes del *software* de control y ejecuta las acciones correspondientes en el sistema físico. Estas acciones incluyen la apertura de puertas y ventanas, el control de iluminación, la activación de ventiladores y el encendido de dispositivos electrónicos, mediante el uso de actuadores y sistemas de control.

Sistema domótico

Como resultado, se obtiene un sistema domótico controlado mediante movimientos oculares del usuario, particularmente a través de parpadeos. Estos movimientos permiten la navegación dentro de la interfaz y la selección de opciones, facilitando la ejecución de tareas previamente definidas. El sistema se considera domótico debido a la integración inteligente de dispositivos y recursos de *hardware* y *software* para la automatización del entorno. La Figura 2 muestra el funcionamiento general del sistema.

Figura 2. Esquema ilustrativo del proceso para el control domótico

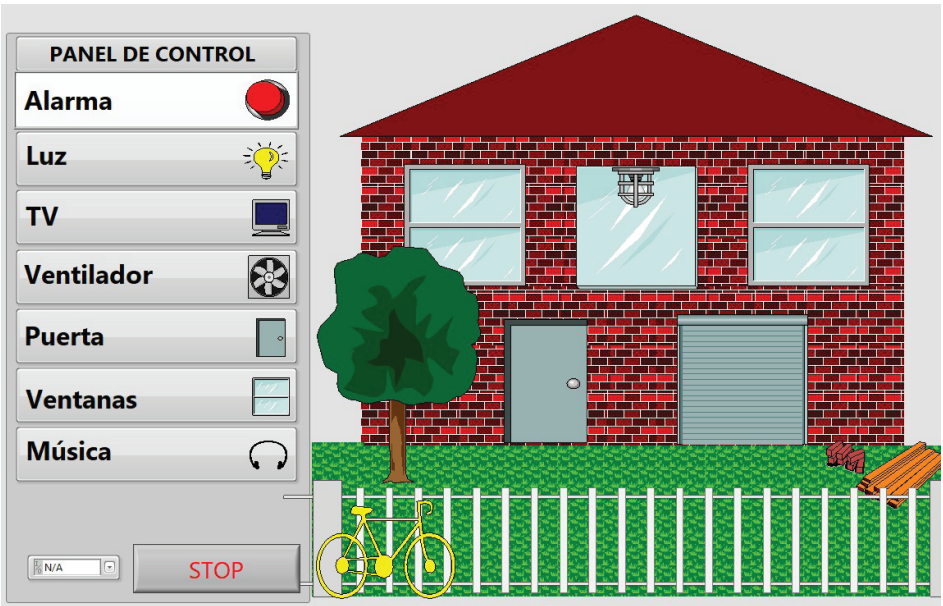


Resultados

Para evaluar el funcionamiento del sistema, se realizaron pruebas piloto con participantes sanos sin experiencia previa en el uso de la interfaz. Estas evaluaciones no tuvieron carácter clínico; no obstante, se orientaron a analizar la facilidad de uso del sistema y la capacidad de los usuarios para ejecutar las tareas

propuestas mediante el control ocular. Con el fin de validar la interacción usuario-interfaz, se solicitó a los participantes realizar una fase de familiarización previa, en la cual practicaron los movimientos oculares requeridos para el manejo del sistema. El esquema de control (Figura 3) se basó en la navegación entre opciones mediante el cierre del ojo derecho, permitiendo cambiar de selección con cada parpadeo, mientras que el cierre del ojo izquierdo se utilizó como acción de confirmación para seleccionar la opción deseada.

Figura 3. Interfaz gráfica del *software* de programación visual LabVIEW



Para garantizar una adecuada captura de las imágenes oculares, las pruebas se realizaron en un entorno con iluminación controlada. Se utilizó un soporte para cámara web que permitió posicionarla de manera frontal respecto al participante, quien permaneció sentado durante la evaluación. La computadora que ejecutaba la interfaz desarrollada en LabVIEW se colocó próxima a la cámara, con el fin de favorecer que el usuario mantuviera la mirada dirigida hacia el dispositivo durante la interacción. Una vez iniciado el sistema, se solicitó a

los participantes seleccionar botones específicos dentro de la interfaz, como se muestra en la Figura 4. Tras un breve periodo de familiarización, los usuarios lograron adaptarse al esquema de control, lo que les permitió ejecutar las funciones del entorno domótico con relativa facilidad.

Figura 4. Pruebas de funcionamiento del programa Python de visión computacional



Entre las observaciones más relevantes se identificó una adecuada facilidad inicial por parte de los participantes para comprender el funcionamiento y control de la interfaz, así como una progresiva adaptación a la velocidad de respuesta del sistema durante el uso. Asimismo, se observó una mayor preferencia por la selección de funciones relacionadas con los botones de “Puerta” y “Luz”, lo que sugiere una interacción intuitiva con las tareas básicas del entorno domótico. Sin embargo, también se evidenció la necesidad de mantener una posición estable frente a la cámara para lograr un desempeño óptimo del

sistema. Al finalizar las pruebas, se detectaron áreas de mejora importantes, particularmente en la parametrización de los movimientos oculares, ya que algunas señales pueden confundirse con parpadeos involuntarios, así como en la sensibilidad del sistema, debido a errores de identificación ocasionados por cambios abruptos en la iluminación o en la posición de la cámara. En conjunto, estos resultados cualitativos sugieren que el sistema presenta un alto potencial como herramienta de automatización de tareas y como alternativa tecnológica de asistencia para personas con limitaciones de movilidad.

Conclusiones

Los objetivos planteados en este trabajo se cumplieron de manera parcial, logrando el desarrollo de un sistema funcional basado en visión artificial para la detección de movimientos oculares y su aplicación en el control de un entorno domótico a escala. La parametrización de los movimientos permitió identificar patrones de interacción; sin embargo, se observaron limitaciones en la robustez del sistema ante variaciones en la iluminación y en la posición de la cámara. Para mitigar estos efectos, se recomienda el uso de iluminación frontal uniforme, así como mantener una posición estable del usuario frente a la cámara, a una distancia aproximada de 40 cm a 50 cm. Estas condiciones contribuyen a mejorar la precisión en la detección de los movimientos oculares. En cuanto a la interfaz de control, se presentaron inconvenientes en la comunicación con la placa de desarrollo, los cuales fueron resueltos mediante el reinicio del *toolkit* correspondiente. Por otra parte, el sistema de *hardware* no mostró fallas significativas, lo que indica una correcta implementación de las conexiones y dispositivos empleados. En conjunto, el sistema desarrollado demuestra viabilidad como herramienta de asistencia, siempre que se mantengan condiciones controladas de operación. Como trabajo futuro, se propone mejorar la robustez del sistema ante cambios en el entorno, optimizar la comunicación entre *software* y *hardware*, y evaluar su desempeño en escenarios reales con usuarios potenciales, lo que permitiría avanzar hacia su implementación a mayor escala en aplicaciones domóticas.

Referencias

Amaya Fariño, L. M., Tumbaco Reyes, A., Roca Quirumbay, E., Villón González, T., Mendoza Morán, B. y Reyes Quimís, Á. (2020). El IoT aplicado a la domótica. *Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU), 7*(1), 21-28. https://doi.org/10.26423/rctu.v7i1.490

Ardiles Sotomayor, R. C. (2017). *Creación de un sistema de comunicación aumentativo alternativo (SCAA) dirigido a personas con síndrome de enclaustramiento* [Tesis doctoral]. Universidad Gabriela Mistral. https://hdl.handle.net/20.500.12743/1084

Avila-Tomás, J. F., Mayer-Pujadas, M. A. y Quesada-Varela, V. J. (2020). La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina I: Introducción antecedentes a la IA y robótica. *Atención Primaria, 52*(10), 778-784. https://doi.org/10.1016/j.aprim.2020.04.013

Collaguazo Angamarca, D. A. (2024). *Visión artificial para el control domótico de una persona con movilidad reducida en el geriátrico Mi dulce hogar* [Tesis de licenciatura]. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28725

Mc Cann, F. y Stephen, D. (2024). Visión artificial y medicina legal: Retos y oportunidades en la era de la inteligencia artificial. *Antistio: Revista Científica del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de Colombia, 1*(1).

Meléndez Pertuz, F. A., Sánchez Dams, R., Caicedo Ortiz, J. G., Vélez Zapata, J., Ovallos Gazabón, D. A., Mendinueta Gámez, V. A. y Cortés Ortiz, G. A. (2018). Design and development of a didactic and innovative dashboard for home automation teaching using LabVIEW programming environment. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13*(2), 523-528. https://hdl.handle.net/11323/4685

Morán Lino, B. W., González Palomeque, P. R. y Prieto León, A. (2020). *Diseño de un sistema electrónico para realizar pruebas de domótica pasiva sobre maquetas o prototipos de edificaciones* [Tesis doctoral]. Escuela Superior Politécnica del Litoral. http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/57217

Racca Velásquez, F., Benítez Arce, S. C., Sabalza Castilla, J., Moyano, C. y Fernández, A. (2025). Síndrome de enclaustramiento: Reporte de un caso. *Salud(i)Ciencia, 27*(5-6), 261-265. https://doi.org/10.21840/siic/175352

Ramos, V. P. L., Salazar, E. M. y Verbel, L. P. (2011). Síndrome de enclaustramiento: A propósito de un caso. *Revista Ciencias Biomédicas, 2*(1), 116-120. https://doi.org/10.32997/rcb-2011-3402

Riveros, R., García, C., Aparicio, A., Hojas, A. M., Figueroa, P., Lange, M., Angulo, V., Olguín, P. y Rosas, R. (2014). Tecnología, acompañamiento psicológico y neuropsicología: Tres vías para salir del síndrome de enclaustramiento. *Revista Chilena de Neuropsicología, 9*(1), 14-20. 10.5839/rcnp.2014.0901E.04

Roosemberg, F., Baquerizo, P., Martinez, E. y Abril, P. (2024). Síndrome de enclaustramiento: Presentación de caso clínico y revisión de la literatura. *Investigatio, 1*(22). https://doi.org/10.31095/investigatio.2024.22.4

Vásquez Arboleda, J. O. y Tixi Ramos, L. M. (2023). *Desarrollo de un sistema de control y monitoreo utilizando la plataforma IoT Kaa, interfaz DAQ y LabVIEW, para aplicaciones domóticas* [Tesis de licenciatura]. http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26384

Thermal characterization of a solar dryer like an alternative sustainable dry on climatological conditions in autumn

Arturo Álvarez Galeana,[a] Erick Omar Castañeda Magadán,[a*] Víctor Manuel Zezatti Flores,[b] Ángel Tlatelpa Becerro,[c] Erick César López-Vidaña[d]

Abstract

The present investigation focusses on the internal thermal characterization of a solar dryer by forced convection for the products dehydration of human consumption, selecting a fruit like an initial model (apple). Drying or dehydration of fruit was carried out under different operation conditions (autumn climate changes) such as solar radiation, temperature, humidity and air velocity in the environment northeast of Morelos state (Cuernavaca). The experimental tests development was carried out in September to December 2025, selecting the mayor radiation days or clear skies. The results show a maximum mass diminution fruit of 83.6 %, changing the main product physical characteristics in the drying process in an average time of 8 hours.

Keywords: solar dryer, solar radiation, thermal characterization.

Introduction

An apple is a consumption fruit on a large scale worldwide; however, it is nature implies faster deterioration due it is high water content. Drying (dehydration)

[a] Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, UAEM.
[b] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[c] Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla, UAEM.
[d] Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.
[*] Corresponding author: erick.castaneda@uaem.mx

is an alternative ecological method for the conservation and consumption in a mayor time products, such as the selected product for the present study (Kidane et al., 2025a; 2025b). Thermal characterization of the dryer under different climatic conditions allows modify the main physical properties of the product (texture, color, and aroma) preserving the flavor, minerals, fiber and most of the nutrients by concentrating them through volume reduction (Badaoui et al., 2022; Maldonado Holguín, 2025).

Solar dryers are a cheaper alternative compared with conventional processes that employ energetic resources, allowing the use of solar radiation as clean energy to reduce the humidity, mass product, environment impact and the production or preserving cost (Kidane et al., 2025a; Sharma et al., 2025; García et al., 2012).

Methodology and materials

Solar dryer (Figure 1) is made of aluminum and polycarbonate panels; it has an upper and lower tray for storing products. Inside thermal characterization of dryer was carried out in real time using a total of ten temperature sensors: eight DSI8B20 *type* sensors and 2 RTD PT100 *type* (Martínez-Rodríguez, 2025; Acosta Miranda, 2023).

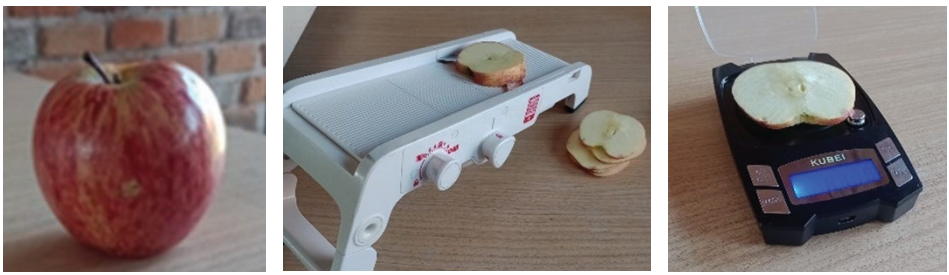
Figure 1. Solar dryer: internal trays (a), and solar radiation exposition (b)



a) b)

Selected apples like a drying product (Figure 2) come from the aforementioned study region, this product was washed and cut homogeneously in three millimeters thick slices. The cut probes (slices) were weighed and placed at five strategic points for thermal analysis of the dryer, as well as to evaluate the humidity loss of the product (Figure 1a) (Barrera Díaz, 2022; Mayo Rebolledo, 2024).

Figure 2. Selected product: apple (a), cut process (b), and weight process (c)



a) b) c)

Solar characterization and the drying process was carried out in an interval time from 8:00 to 16:00 hours on sunny days and clean skies according to the consulted meteorological station (Meteored, n. d.) recording temperature, time and weight loss (Ngueagni & Mawire, 2025). It was developed the normalization of the experimental tests to guarantee the obtained results; during every test it was recording and consulted about the different climatological conditions (temperature, solar radiation, environment humidity) by through (Meteored, n. d.) and an *in-situ* station. The solar dryer was placed in a location where it received direct sunlight for a minimum of eight hours (Sharma et al., 2025). In a parallel way the cut process was carried out to obtain three millimeters thick slices, measuring every cut thick and weighing the slice to record initial weight. Slices was located in an upper and lower tray such as Figure 1a shows, starting drying process and measuring internal temperature during consecutive eight hours; Table 1 show three aleatorily tests. The weight and thickness of each sheet were recorded every hour, as well as

the humidity inside the dryer until the end of the test (Badaoui et al., 2022; Ngueagni & Mawire, 2025; Maldonado Holguín, 2025).

Table 1. Internal temperature of the solar dryer

Sensor	Test 1 (°C)	Test 2 (°C)	Test 3 (°C)	Average (°C)
1	59.37	55.23	60.49	58.36
2	58.81	55.57	59.65	58.01
3	57.83	54.08	59.37	57.09
4	58.55	56.47	62.20	59.07
5	48.53	45.44	48.89	47.62
6	48.92	46.10	49.82	48.28
7	49.04	45.78	48.92	47.91
8	50.37	42.50	52.18	48.35
RTDs	54.00	50.22	55.15	53.12

Results

According to results shown in Table 2, the weight loss in the dried product is directly proportional to the time per hour. This table contains the initial and final average weights in the different tests performed, showing it is effectiveness in the humidity decrease respect to the initial and final weight (Badaoui et al., 2022; Martínez-Rodríguez et al., 2025; Ngueagni & Mawire, 2025; Kidane et al., 2025b).

Furthermore, Figure 3 confirms the above, showing a decrease in humidity until a linear or constant behavior of the product weight in a time interval between 14:00 and 16:00 hours (Badaoui et al., 2022; Martínez-Rodríguez et al., 2025; Kidane et al., 2025b).

Table 2. Summary results, weight vs. time

Hour	Test 1 (gr)	Test 2 (gr)	Test 3 (gr)	Average (gr)
08:00	10.98	8.31	6.70	8.67
09:00	10.05	6.82	5.91	7.59
10:00	8.21	5.23	4.27	5.90
11:00	6.01	3.55	2.69	4.08
12:00	3.49	2.29	1.28	2.35
13:00	2.03	1.77	1.00	1.60
14:00	1.70	1.67	0.97	1.45
15:00	1.66	1.65	0.97	1.43
16:00	1.67	1.62	0.97	1.42

Figure 3. Average weight vs. time

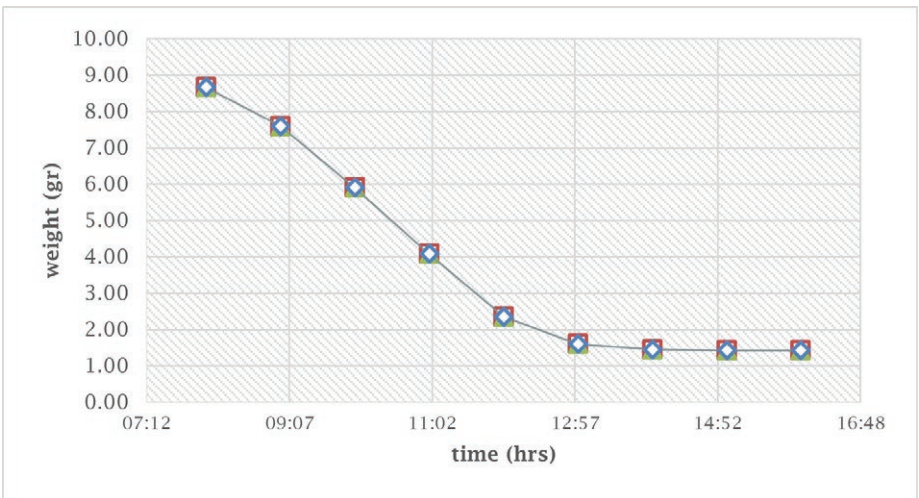


Figure 4 shows the main physical changes in the apple slices demonstrating an evident change after the drying or dehydration process of the product, noting the loss of mass-moisture in each slice (Kidane et al., 2025a; Badaoui et al., 2022; Martínez-Rodríguez, 2025; Meteored, n. d.; Ngueagni & Mawire, 2025; Acosta Miranda et al., 2023; Maldonado Holguín, 2025).

Figure 4. Dehydrated product: start of test (a), finish of test (b)



a)



b)

Conclusions

The standardization of experimental tests and the selection of days with higher solar radiation, as well as clear skies, allow establishing a dehydration time of the product at a maximum of six hours, decreasing the drying time until two hours for the future experimental tests. On the other hand, the maximum temperature achieved inside the solar dryer is 53.09 °C, with this temperature the humidity of dried products decreased to an average of 83.6 % compared to it is original weight. The apple exhibits evident physical changes after drying. However, climatological conditions are uncontrollable variables in an environment that, despite selecting days with higher solar radiation or clear skies, can change suddenly, affecting the drying time of the selected products (Sharma et al., 2025; Mayo Rebolledo, 2024), According to several studies (Badaoui et al., 2022; Martínez-Rodríguez et al., 2025; Acosta Miranda et al., 2023; Sharma et al., 2025; Kidane et al., 2025a; 2025b), behavior and results obtained for the present double-tray solar dryer show similar results. Furthermore, the drying time is lower compared to previously mentioned despite climatological conditions and the period time of experimental tests was development (Autumn).

Acknowledgments

To Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería and Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, both belonging to the Universidad Autónoma del Estado de Morelos, for their facilities and support during my research stay. To my reviewers for their time, dedication, knowledge, and the lessons I learned during my academic research stay.

References

Acosta Miranda, M. L., Pérez Machorro, J., & Ángeles Hernández, L. (2023). Automated solar dryer. *Journal IPSUMTEC, 6*(6), 87-94. https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v6i6.58

Badaoui, O., Djebli, A., & Hanini, S. (2022). Solar drying of apple and orange waste: Evaluation of a new thermodynamic approach and characterization analysis. *Renewable Energy, 199*, 1593-1605. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.098

Barrera Díaz, J. de J. (2022). *Secado de nanche y guaje usando un secador solar indirecto de flujo forzado* [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

García, L. E., Mejía, M. F., Mejía, D. J., & Valencia, C. A. (2012). Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. *Avances Investigación en Ingeniería, 9*(2), 9-19. https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/2712

Kidane, H., Farkas, I., & Buzás, J. (2025). Design, Fabrication, and Performance Evaluation of Solar Drying Chamber Used for Apple Slices. *Acta Technologica Agriculturae, 28*(3), 141-148. https://doi.org/10.2478/ata-2025-0018

Kidane, H., Farkas, I., & Buzás, J. (2025). Mathematical modeling of golden apple drying and performance evaluation of solar drying systems using energy and exergy approach. *Scientific Reports, 15*, 7805. https://doi.org/10.1038/s41598-025-92133-2

Maldonado Holguín, L. F. (2025). Estudio de un proceso de secado para manzana deshidratada tratada con antioxidantes naturales: Analysis of a drying process for dehydrated apples with preservation of antioxidants. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando, 6*(2), 3272-3287. https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i2.868

Martínez-Rodríguez, G., Olmos-Cruz, R. A., Sánchez-García, E., & Baltazar, J.-C. (2025). Minimization of drying time and thermo-economic evaluation during solar dehydration of apple. *Chemical Engineering Transactions, 120*, 55-60. https://doi.org/10.3303/CET25120010

Mayo Rebolledo, A. (2024). *Estudio numérico y optimización de un secador solar indirecto experimental* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Meteored. (N. d.) *Clima en Dima*. https://www.meteored.mx/clima_Dima-Europa-Espana-Vizcaya--1-7315.html

Ngueagni, P. T., & Mawire, A. (2025). Experimental drying characteristics of a portable solar dryer for apple slices in consecutive and continuous tests. *Scientific African, 30*, e03012. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e03012

Sharma, B. B., Vaidya, P., Kumar, N., Tiwari, A., Bansal, S., Faruque, M. R. I., & Al-mugren, K. S. (2025). Enhancing post-harvest sustainability in temperate crops through smart IoT-integrated indirect solar dryer. *Scientific Reports, 15*, 28608. https://doi.org/10.1038/s41598-025-13499-x

Integration of solar heat storage system for the continuous powering of an absorption heat transformer: Autonomous University of Morelos study case

Luis Adrián López Pérez,[a] Armando Huicochea,[a*]
Tabai Torres Díaz,[a] Javier Delgado Gonzaga,[b]
Sandro Guadalupe Pérez Grajales[a]

Abstract

The integration of an absorption heat transformer (AHT) with a solar thermal storage system (STSS) is an important strategy for mitigating solar intermittency. However, AHTs require a stable and continuous thermal supply, which limits their practical operation. In this work, we evaluate the performance of an STSS for the continuous activation of an AHT under solar conditions at the Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Chamilpa campus. Therefore, we size and evaluate the performance of an STSS, considering a continuous demand for hot water at 81 °C to the AHT, which simultaneously raises it to 95 °C. The results showed that an STSS, with a collector area of 110 m^2 and storage of 13.2 m^3, achieves a solar thermal gain of 1007.6 kWh/m^2-year, covering 97 % of the AHT's annual energy requirements. This configuration allows a return on investment for the STSS of 7.3 years.

Keywords: double absorption heat transformer, energy and exergy analysis, process heat, solar water heating system, steam solar.

[a] Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, UAEM.
[b] Ingeniería en Sistemas Electrónicos, Universidad Politécnica del Estado de Morelos.
[*] Corresponding authors: huico_chea@uaem.mx

Introduction

Solar energy is one of the most promising renewable resources, however, its use in continuous industrial processes remains limited. Solar radiation is inherently intermittent because of daily and seasonal variations, which restricts its direct integration into thermally driven systems requiring stable operating conditions. Absorption heat transformers (AHTs) have emerged as an effective technology for upgrading low-temperature heat (Cudok et al., 2021). In these cycles, water acts as the refrigerant, evaporating at low temperature, while the absorbent solution captures the vapor and releases heat at a higher temperature suitable for industrial reuse. Despite their potential, AHTs require a stable and continuous thermal input to the generator and evaporator. Variations in driving temperature can lead to unstable operation, reduced efficiency, and crystallization risks. Consequently, when solar energy is used as the main heat source, appropriate thermal storage and system sizing become essential.

Solar thermal storage systems (STSS) are essential for mitigating solar intermittency and enabling continuous energy supply. These systems store excess heat during high irradiance periods and release it during low radiation conditions using sensible, latent, or thermochemical storage mechanisms. Nevertheless, storage technologies present inherent thermal losses. Sensible heat storage tanks can experience losses between 15 % and 30 %, while latent heat storage systems may reach losses close to 10 % (Delgado-Gonzaga et al., 2020). Therefore, optimized sizing of both collector area and storage capacity is required to ensure reliable and economically feasible operation. When integrated with an AHT, an STSS provides the stable driving temperature necessary for the absorption/desorption cycle and compensates for solar variability, enabling improved utilization of both solar energy and low-grade heat.

Solar-powered AHT configurations have been investigated for multiple applications including power generation, heating, cooling, and desalination. Hybrid solar-AHT systems have achieved energy efficiencies up to 56.8 % and exergetic efficiencies of 33.4 % (Stieglitz & Platzer, 2024). Comparative studies of solar collectors indicate that evacuated tube collectors are preferable for

higher temperature operation in AHT systems (Cabeza et al., 2011). In México, experimental and theoretical studies have confirmed the feasibility of STSS-powered AHT systems. Continuous operation prototypes have shown significant greenhouse gas mitigation and competitive energy costs (Wang et al., 2022). Building air-conditioning applications have achieved integral COP values near 0.7 (Bellos et al., 2024), and desalination systems powered by STSS-AHT configurations have produced freshwater and steam under favorable solar conditions (Martínez-Rodríguez et al., 2023).

Although previous research demonstrates the thermodynamic feasibility and environmental benefits of solar-powered AHT systems, most studies emphasize performance evaluation rather than the design methodology required to ensure continuous operation. In particular, the sizing of solar thermal storage systems capable of maintaining uninterrupted AHT activation under realistic climatic conditions has received limited attention. Climates with variable irradiance, humidity, and seasonal temperature fluctuations, such as subtropical and semi-arid regions, pose additional challenges for reliable solar heat supply. Without adequate storage design, intermittent solar input can compromise system stability and economic viability. Therefore, the objective of this work is to assess the annual performance of a STSS system designed to guarantee continuous activation of an AHT under the solar conditions of the Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), México. A parametric analysis is conducted to determine the collector area and storage tank volume required to continuously supply hot water at 81 °C to the AHT generator, allowing temperature upgrading to 95 °C. The study quantifies solar fraction (SF), solar heat gain (SHG) and the payback period, providing design criteria for reliable solar-powered heat upgrading in subtropical climates.

Materials and methods

The methodology comprises three stages. First, the climatic conditions of the study site and the technical specifications of both the STSS and the AHT prototype are defined. Second, the STSS is thermodynamically modeled in TRNSYS using

mass and energy balances (Peña Guerra et al., 2023). Third, the collector area (A_c), storage volume (V_t), and pump mass flow rate ($\dot{m}$)are optimized according to the AHT thermal demand, evaluating solar fraction (SF), solar heat gain (SHG), and auxiliary heat ($\dot{Q}_{Aux}$) under different utilization ratios (UR) and volume ratio (VR).

Meteorological data and boundary conditions

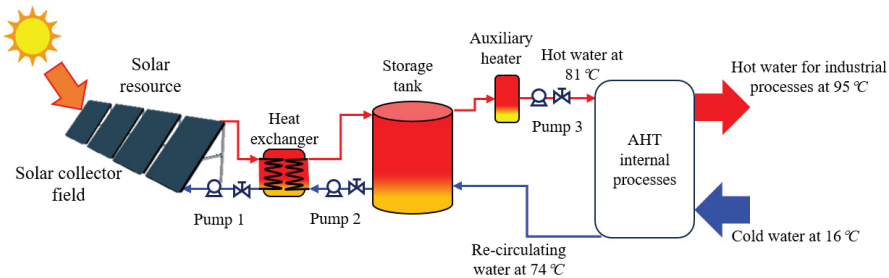
The dynamic simulations are performed using Typical Meteorological Year-2 (TMY-2) data representative of the climatic conditions at the UAEM, Chamilpa campus (18.99° N, 99.24° W; 1,890 masl) (Gomri, 2009). The annual average global horizontal irradiation at the site is approximately 5.5 kWh/m²day, with peak solar availability occurring during the dry season (March-May) and reduced irradiance during the rainy season (June-September). Ambient temperature varies between typical winter minima of 15 °C and spring maxima of 32 °C, with an annual average near 21 °C. Seasonal humidity increases during summer months, influencing both collector efficiency and thermal losses.

STSS-AHT integration configuration

Figure 1 schematically illustrates the integration of the STSS-AHT system. The modeled STSS is based on the design proposed by Heß & Oliva (2010), originally implemented in a large-scale industrial facility in Würzburg, Germany, where it demonstrated the capability to support continuous washing and cleaning processes. The STSS consists of a solar collector field, a heat exchanger, pumps ($\dot{m}_1$ and $\dot{m}_2$), valves, a stratified thermal storage tank, and an auxiliary heater. Its operation is straightforward: the collectors capture solar radiation and transfer the energy to a heat transfer fluid, which subsequently delivers heat to the water stored in an insulated tank. When thermal energy is required, hot water is distributed to the point of use through pipelines, providing controlled heat delivery. During periods of low irradiance, the auxiliary heater raises the temperature to the setpoint. The AHT employs the LiBr/H_2O working pair and enables

water temperature upgrading from 16 °C to 95 °C, operating with a utilization mass flow rate ($\dot{m}_{use}$) of 0.019 kg/s. The system requires 17,280 l/day of hot water at 81 °C, with a flow rate in pump 3 ($\dot{m}_3$) of 0.2 kg/s, distributed between the generator and the evaporator. Under these conditions, a temperature lift (ΔT) of 14 °C and a coefficient of performance (COP) of 0.44 are achieved (Remund et al., 2023).

Figure 1. STSS-AHT integration configuration



Mathematical modeling

Table 1 provides a summary of the equations employed to model the STSS-AHT integration, as well as the equations used to determine its energy and economic performance, following the methodology of López-Pérez et al. (2025). The model is implemented in TRNSYS using a quasi-transient formulation based on mass and energy conservation and component-specific correlations (Peña Guerra et al., 2023).The solar field useful gain, heat exchanger transfer, and storage tank behavior are described through an overall energy balance that includes stored energy, thermal losses, and auxiliary heat supply. When solar energy is insufficient, auxiliary heating compensates to meet the AHT demand. Model validation was conducted by comparing SF and SHG with literature data (Klein & Beckman, 2007), obtaining R^2 values between 0.98 and 0.99 and deviations below 4.5 %. Design parameters UR and VR guide system sizing to maximize SF and SHG at 81 °C under continuous operation. Economic feasibility is estimated via simple payback, excluding AHT prototype costs (Remund et al., 2023). The payback

Table 1. Summary of equations for modeling STSS-AHT integration

No.	Equation	Description
1	$\dot{Q}_u = A_c \times F_R \left[\left(I \times \tau \times \alpha \right) - U_c \left(T_i - T_a \right) \right]$	Useful gain from the solar field (W).
2	$\dot{Q}_{HX} = \varepsilon \times \dot{m} \times C_{p,hot} \times \Delta T$	Heat transferred in the heat exchanger (W).
3	$\dot{Q}_{HX} = \dot{Q}_T + \dot{Q}_L + \dot{Q}_{AH}$	Energy balance of the tank (W).
4	$\dot{Q}_{AH} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T_{T-AH}$	Energy supplied to the auxiliary heater, (W).
5	$\dot{Q}_T = \dot{m} \times C_p \times \Delta T_{HX-T}$	Energy stored in the tank (W).
6	$\dot{Q}_L = UA_T \times \Delta T_T$	Thermal losses from the tank (W).
7	$\dot{Q}_{Aux} = \frac{\dot{m} \times C_p \left(T_{set} - T_{in} \right) + UA_{AH} \times \Delta T_{AH}}{\eta_{AH}}$	Energy sent to the auxiliary heater (W).
8	$\dot{Q}_{Demand} = \dot{m} \times C_p \left(T_{out} - T_{in} \right)$	Thermal demand of the AHT (W).
9	$SF = \frac{\dot{Q}_{AH}}{\dot{Q}_{Demand}} \times 100$	Solar Fraction (%).
10	$SHG = \frac{\dot{Q}_{AH}}{A_c}$	Solar Heat Gain (W/m^2).
11	$UR = \frac{Demand}{A_c}$	Utilization ratio (l/m^2·día).
12	$VR = \frac{V_t}{A_c}$	Volume-to-area ratio (l/m^2).
13	$A_c = \frac{Demand}{UR}$	Required collector area (m^2).
14	$V_t = A_c \times VR$	Required tank volume (l).
15	$PB = \frac{ln\left(\frac{I_0 \left(I_F - d \right)}{f \times LC \times F_1} + 1 \right)}{ln\left(\frac{1 + I_F}{1 + d} \right)}$	Payback period (years).

period is determined using Equation 15, where I0 is the total cost of the equipment required for the project, of 416.35 USD/m^2; *f* means the proportion of solar energy used, in %; *d* is the discount rate applied, of 8 %; I_F reflects fuel cost inflation, of 10 %. *LC* denotes the total annual energy required, 188.2936 GJ; and F_1 is the international fuel price per unit of energy, 34.8 USD/GJ for natural gas (Heß & Oliva, 2010).

Energy assessment

Table 2 details the hot water thermal demands of the AHT prototype. The STS is sized based on A_c and V_t, seeking to optimize SF and SHG with the variation of UR and VR, and the mass flows of Pump 1 ($\dot{m}_1$) and Pump 2 ($\dot{m}_2$), following Heß & Oliva (2010). The $\dot{Q}_{Aux}$ requirements are examined under economic and environmental criteria considering natural gas (Varela-Martínez et al., 2022).

Table 2. Thermal requirements of the STSS for continuous activation of the AHT

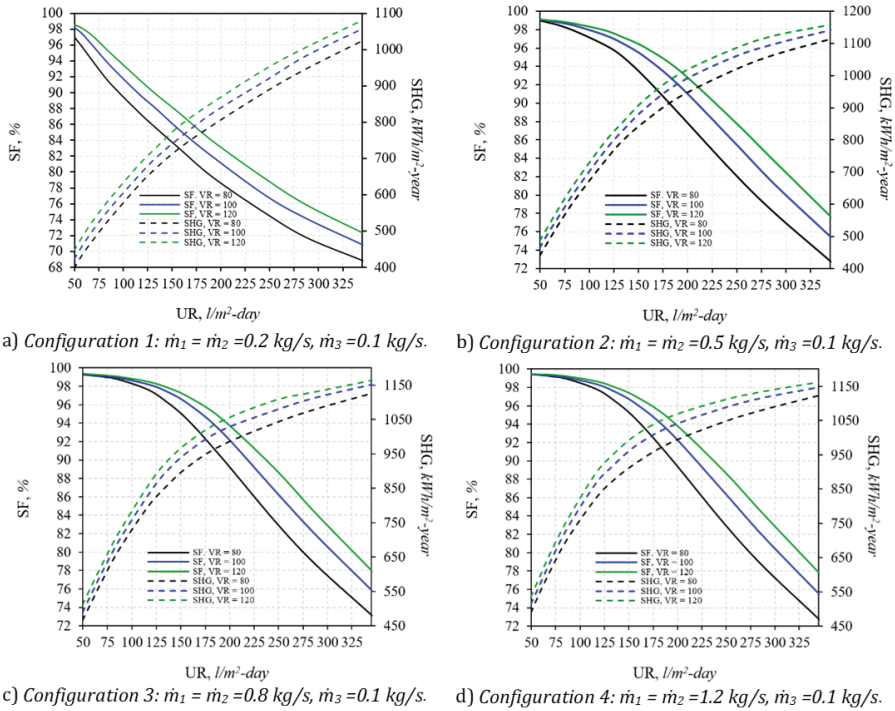
STSS				AHT				
Demand (L/day)	$\dot{m}_3$ (kg/s)	T_{int} (°C)	T_{out} (°C)	Demand (l/day)	$\dot{m}_{use}$ (kg/s)	T_{int} (°C)	T_{out} (°C)	COP
17,280	0.2	74	81	1,693.4	0.019	16	95	0.44

Results

Figure 2 shows the performance achieved with the STSS to power the AHT for one year at UAEM, in terms of SF and SHG. UR, VR, $\dot{m}_1$ and $\dot{m}_2$ were varied from 50-345 l/m^2-day, 80-120 l/m^2, and 0.2-1.2 kg/s, respectively. The results showed an inverse relationship between SF and RH, while SHG increases with RH. Configuration 1 (low flow rates, 0.2 kg/s) had the lowest SF and SHG values across the entire range. Configurations 2, 3, and 4 (flow rates of 0.5 kg/s, 0.8 kg/s, and 1.2 kg/s) show very similar behavior, with no significant differences between them, although

they are superior to Configuration 1. Increasing VR consistently improves both indicators, with VR of 120 l/m² achieving maximum performance. The best performances were achieved with mass flow rates $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ of 0.5 kg/s, 0.8 kg/s, and 1.2 kg/s, from Configurations 2, 3, and 4, respectively, operating with VR of 120 l/m².

Figure 2. Performance achieved with the STSS to power the AHT for one year at UAEM



a) *Configuration 1: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 0.2$ kg/s, $\dot{m}_3 = 0.1$ kg/s.*

b) *Configuration 2: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 0.5$ kg/s, $\dot{m}_3 = 0.1$ kg/s.*

c) *Configuration 3: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 0.8$ kg/s, $\dot{m}_3 = 0.1$ kg/s.*

d) *Configuration 4: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 1.2$ kg/s, $\dot{m}_3 = 0.1$ kg/s.*

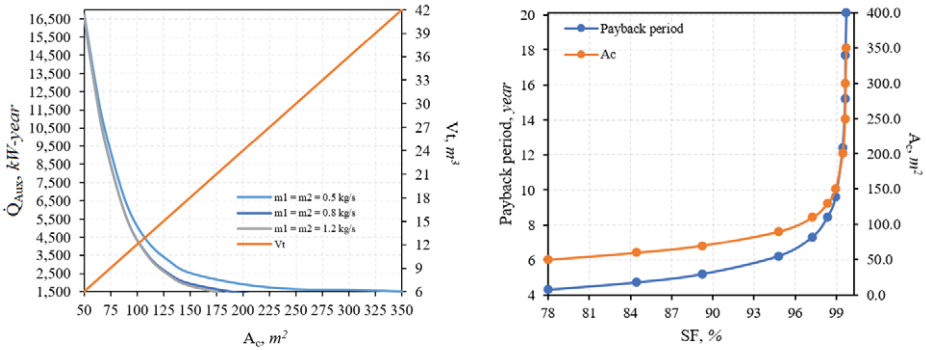
Figure 3 shows the $\dot{Q}_{Aux}$ requirements compared with A_c and V_t (Figure 3a) for the three configurations that achieved the best STSS performance for continuous activation of the AHT over one year. It also shows the recovery period for the investment in the selected optimal configuration, analyzed in relation to SF and A_c (Figure 3b). We observed that the most balanced $\dot{Q}_{Aux}$ values correspond to A_c in the range of 90-110 m², with m of 1.2 kg/s, considering a unit cost per

square meter installed of STSS of 416.3 in México of USD/m². An STSS with Ac of 90 m² and Vt of 10.8 m³ achieved an SF of 94.5 %, SHG of 1061.1 kWh/m²-year and requires a $\dot{Q}_{Aux}$ of 5540 kW-year, with an investment of USD 37,467. However, an STSS with A_c of 110 m² and V_t of 13.2 m³ requires an additional USD 8,326, but reduces the $\dot{Q}_{Aux}$ to 3445.4 kW-year (saving 2,095 kW-year) and raises the SF to 97 %, maintaining a high SHG of 1007. 6 kWh/m²-year. Beyond this point, the benefits diminish: moving to 130 m² would cost another USD 8,326 to save only an additional 1,053 kW-year. Therefore, the optimal and balanced configuration is achieved with an A_c of 110 m² and a V_t of 13.2 m³, which maximizes thermal performance with an investment justified by significant energy savings. Analysis of the relationship between A_c, SF, and Payback revealed asymptotic behavior of SF with respect to A_c, with small decreasing increments: when going from 50 m² to 90 m², SF increases by 16.8 percentage points (up to 94.5 %), while from 90 m² to 130 m² the increase is only 3.6 points (up to 98.1 %). At the same time, Payback grows progressively, from 4.3 years at 50 m² to 20.1 years at 350 m², with a maximum slope in the range of 110-150 m² (0.57 years for every additional 10 m²). The technical-economic equilibrium zone is around 110 m², where an SF of 97.0 % was achieved with a payback period of 7.33 years. For areas larger than 130 m², the gain in SF is lower (<0.5 points) while the payback period extends beyond 8.5 years, making oversizing inadvisable from a financial perspective.

Conclusions

The annual performance evaluation of a STSS integrated with an AHT at the UAEM leads to the following conclusions: The optimal configuration of the STSS corresponds to an A_c of 110 m², a V_t of 13.2 m³, and an $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ of 1.2 kg/s. This configuration achieved an SF of 97.0 %, covering almost the entire annual energy demand of the AHT, with an SHG of 1007.6 kWh/m²-year and a reduction in auxiliary energy to 3445.4 kW-year. The return on investment period is 7.33 years, falling within the technical-economic equilibrium zone where performance is maximized without incurring oversizing that would extend the payback beyond

Figure 3. Energy performance and economic viability of the STSS based on collector area and storage volume



a) A_c *vs* $\dot{Q}_{Aux}$ *vs* V_t b) *SF vs Payback vs* A_c

8.5 years. The study validates that, even in subtropical climates with variable radiation, proper sizing of the STSS can mitigate solar intermittency and guarantee the stable thermal supply required by the AHT, demonstrating the technical and economic viability of this integration.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support provided by the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación and the Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas of the UAEM for this research endeavor.

References

Bellos, E., Arabkoohsar, A., Lykas, P., Sammoutos, C., Kitsopoulou, A., & Tzivanidis, C. (2024). Investigation of a solar-driven absorption heat transformer with various collector types for industrial process heating. *Applied Thermal Engineering, 244*, 122665. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122665

Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A., & Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(3), 1675-1695. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018

Cudok, F., Giannetti, N., Ciganda, J. L. C., Aoyama, J., Babu, P., Coronas, A., Fujii, T., Inoue, N., Saito, K., Yamaguchi, S., & Ziegler, F. (2021). Absorption heat transformer - state-of-the-art of industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141*, 110757. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110757

Delgado-Gonzaga, J., Juárez-Romero, D., Saravanan, R., Márquez-Nolasco, A., Huicochea, A., & Morales, L. I. (2020). Performance analysis of a dual component generator-condenser of an absorption heat transformer for water desalination. *Thermal Science and Engineering Progress, 20*, 100651. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100651

Energy Information Administration (2025). *Short-Term Energy Outlook* [accessed February 15, 2026] https://www.eia.gov/outlooks/steo/

Gomri, R. (2009). Energy and exergy analyses of seawater desalination system integrated in a solar heat transformer. *Desalination, 249*(1), 188-196. https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.021

Heß, S. & Oliva, A. (2010). *Solar Process Heat Generation: Guide to Solar Thermal System Design for Selected Industrial Processes*. Fraunhofer. https://doi.org/10.24406/publica-fhg-295302

Klein, S. A., & Beckman, W. A., Mitchell, J. W., Duffie, J. A., Duffie, N. A., Freeman, T. L., Mitchell, J. C., Braun, J. E., Evans, B. L., Kummer, J. P., Urban, R. E., Fiksel, A., Thornton, J. W., Blair, N. J., Williams, P. M., Bradley, D. E., McDowell, T. P., Kummert, M., & Arias, D. A. (2007). *TRNSYS 16: A transient system simulation program. Volume 5: Mathematical Reference*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin–Madison. https://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/05-MathematicalReference.pdf

López-Pérez, L. A., & Huicochea, A. (2025). Solar-powered absorption heat transformer: energy performance assessment in dry climates. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 47*, 356. https://doi.org/10.1007/s40430-025-05659-x

Martínez-Rodríguez, G., Baltazar, J. C., & Fuentes-Silva, A. L. (2023). Heat and electric power production using heat pumps assisted with solar thermal energy for industrial applications. *Energy, 282*, 128379. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128379

Peña Guerra, Á. E., Lugo Loredo, S., Kozhiparambil Chandran, S., & Hernández Magallanes, J. A. (2023). Desarrollo de sistemas térmicos solares por absorción para la generación de enfriamiento en la región norte de México. *Química Hoy, 11*(3), 20-26. https://doi.org/10.29105/qh11.03-305

Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., Barsotti, D., Graf, P., & Cattin, R. (2023). *Meteonorm 8: Irradiation Data for Every Place on Earth: Handbook Part I: Software*. Meteotest AG. https://meteonorm.com/assets/downloads/mn82_software.pdf

Stieglitz, R., & Platzer, W. (2024). Thermal energy storage. In *Solar Thermal Energy Systems: Fundamentals, Technology, Applications* (pp. 757-855). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43173-9_8

Varela-Martínez, K., Hernández, J. A., Juárez, D., & Huicochea, A. (2022). Heat transfer study of four nested helical coils inside an absorption heat transformer. *Experimental Heat Transfer, 35*(7), 993-1015. https://doi.org/10.1080/08916152.2021.2002467

Wang, J., Chen, H., Deng, H., & Dong, F. (2022). A combined power and steam system integrated with solar photovoltaic/thermal collector: Thermodynamic characteristics and cost-benefit analyses. *Case Studies in Thermal Engineering, 39*, 102477. https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102477

Conclusión

Desafíos en ciencia y tecnología: transformando ideas en soluciones es un libro que reúne aportaciones importantes en varias disciplinas de la ingeniería, con el fin de difundir los progresos en el ámbito de la ciencia y la tecnología para fortalecer la formación de estudiantes, profesores, investigadores y profesionales. Mediante el uso de estudios de caso, prototipos y soluciones aplicadas, esta publicación busca incentivar las carreras científicas y tecnológicas, además de ofrecer nuevas visiones en la innovación a través del diseño y la mejora de procesos sostenibles. La combinación de química, instrumentación, control, automatización, internet de las cosas (IoT), modelación computacional y análisis de datos demuestra cómo la ingeniería puede avanzar hacia un futuro más eficiente y responsable, promoviendo el desarrollo sostenible en beneficio de la ciencia, la tecnología y la industria, en la academia y la sociedad.

Desafíos en ciencia y tecnología: transformando ideas en soluciones
de Ángel Tlatelpa Becerro
y Guillermo Raúl Carbajal Pérez
(coordinadores)
se terminó en noviembre de 2026.

En la actualidad, la ingeniería en sus diferentes ámbitos tiene un impacto directo en la sociedad, convirtiendo los progresos tanto en la ciencia como en la tecnología en herramientas innovadoras para abordar los desafíos sociales, económicos y ambientales, partiendo desde la innovación. El tercer volumen de la serie "Avances en ingeniería", titulado *Desafíos en ciencia y tecnología: Transformando ideas en soluciones*, compila investigaciones de varias ramas de la ingeniería que convierten conceptos en soluciones teóricas y prácticas diversas. Con esta publicación, los coordinadores y colaboradores buscan dar a conocer los logros y progresos en ciencia y tecnología, con la meta de fortalecer el desarrollo profesional y contribuir al progreso social sostenible.

Universidad Autónoma del Estado de Morelos