



UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



JEEOS

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING
OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

2026

ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD



Vol. 10 Núm. 2 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2026-050410175100-102. ISSN: 2448-8186





DIRECTORIO

L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO

Rector

DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA

Secretario de Servicios Académicos

LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO

Encargado del Despacho de la Secretaría de
Servicios Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX. <http://www.1atindex.unam.mx/> JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 2, Año 2026, es una publicación continúa editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: jeeos@ujat.mx. Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2026-050410175100-102, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 31 de agosto 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores

EDITORIA EN JEFE

M.A. Pauly González Mayo

GESTORÍA Y ASISTENCIA EDITORIAL

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano

MAEE. Mary Cruz Valenzuela Jiménez

ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO

Dra. Sulma Guadalupe Gómez Jiménez

Dra. Margarita del Carmen Noguera Miceli

ASISTENCIA EN TRADUCCIÓN Y MAQUETADO

EDITORES ASOCIADOS INVITADOS

Dr. Darío Colorado Garrido. **Universidad Veracruzana**

Dra. Linda Viviana García Quiñonez. **Universidad Veracruzana**

Dr. Cristian Gómez. **Universidad Veracruzana**

Dra. Deysi Carmina Peña Ortiz. **Universidad Veracruzana**

Dr. Roberto Agustín Conde Gutiérrez. **Universidad Veracruzana**

Dr. Gerardo Alcalá Perea. **Universidad Veracruzana**

Dra. Zaira Ruth Zuviría López. **Universidad Autónoma de Guadalajara**

Dra. Karen Rodríguez Rosales. **Universidad Autónoma de Querétaro**

Dra. Laura López Díaz. **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**

Dr. Erik Ramírez Morales. **Universidad Juárez Autónoma de Tabasco**

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, **Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana- Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luís Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

Índice Vol. 10 Núm. 2 (2026)

Carta editorial

Zuviría-López Z.R.

i-ii

Integración de calor en la purificación de ciclohexano grado textil utilizando etilenglicol como solvente 1-16

Cruz-Valdez J.A.^{1*}, Álvarez-Alor B.², Montalvo-Salinas D.³, Garzón-Pérez A.S.⁴, Alvarado-Méndez P.E.⁵

Fotosíntesis artificial efecto sinérgico de Ti^{3+} , Co^{2+} , Co^{3+} en los mecanismos de activación, acoplamiento c-c hacia la producción de isopropanol 17-30

Pérez- de la Cruz A.Y.¹, Montalvo-Salinas D.^{2*}, Cruz-Valdez J.A.¹, Pérez- Francisco J.M.¹, Jiménez- Castillo U.¹, Álvarez-Alor B.³

Predicción de la potencia en una turbina vestas v52 mediante regresión polinomial y una red neuronal 31-46

Olan-Barroso A.A.^{1*}, Alaffita-Hernández F.A.², Escobedo-Trujillo B.A.¹, Colorado-Garrido D.²

Estrategias de ingeniería de software verde para aplicaciones energéticamente eficientes 47-54

Morales-Reyes E.^{1*}, Pacheco-Reyes J.N.¹, Vázquez-Hernández R.¹, Gilbón-Aburto A.¹, Gómez-Manuel E.¹

Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un colector cilindro parabólico en Coatzacoalcos, México 55-70

Rodríguez-Flores E.¹, González-Martínez M.I.², Fuentes-Orozco S.², Garrido-Meléndez J.³, Márquez-Nolasco A.⁴, Conde-Gutiérrez R.A.^{4*}.

Determinación de la acumulación de metales en *eichhornia crassipes* para valorización de biomasa 71-80

Benítez-Martínez X. S.¹, Domínguez-Villate W. A.¹, Núñez-Correa S.¹, Morales-Salas L.^{2,3*}

Restricciones de sostenibilidad y riesgo de cola en portafolios accionarios de México 81-96

Villada-Medina H.D.^{1*}, Rendón-García J.F.¹, Alcalá-Perea G.²

Análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada con reducción del rizo de corriente de entrada para aplicaciones con celda de combustible de hidrógeno 97-114

Hidalgo-Leal H.D.¹, Cruz-Gutiérrez F.^{1*}, May-Burgos L.D.¹, Sarao-Cruz L.D.J.¹, Pérez-Aguilar A.¹.

Estimado lector:

La tecnología al servicio del hombre en nuestros días es una premisa incompleta si se separa de la eficiencia tecnológica y la responsabilidad ambiental, ambas dimensiones forman el eje rector que debe guiar la aplicación de herramientas en beneficio de la sociedad contemporánea. En este número especial, los trabajos compilados abordan este reto desde diversas aristas de la ingeniería aplicada.

Los artículos que conforman el Número 2 del Volumen 10 de **Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability** reflejan la búsqueda de saberes energéticos y sustentables para el bienestar humano recorriendo desde la optimización de procesos químicos hasta la arquitectura de sistemas digitales. Las soluciones propuestas por los autores responden a problemas críticos que nos llevan a la reflexión, planteamiento de nuevas metodologías y enfoques sobre innovación energética, medio ambiente y desarrollo sostenible, temas que unieron a científicos y académicos en el 5° Simposio de Energía y Sustentabilidad 2025 realizado en octubre de dicho año en Coatzacoalcos, Veracruz, México.

Para comprender la magnitud de los desafíos actuales, este número comprende cuatro líneas temáticas clave. En primer lugar, en el ámbito de la optimización de procesos químicos y la sostenibilidad industrial, destacan las investigaciones sobre ahorro energético mediante la modificación de solventes, la detección de toxicidad por metales en la valorización de la biomasa y la fotosíntesis artificial para producción de isopropanol. Estos estudios demuestran cómo la ingeniería de materiales y los procesos extractivos logran mitigar la huella de carbono industrial por medio de alternativas de bajo costo e impacto ambiental controlado.

En segundo término, dentro del campo de modelado predictivo y las energías renovables se integran trabajos como el análisis del desempeño de la turbina eólica Vestas V52 mediante regresión polinomial y redes neuronales, así como la evaluación experimental de la eficiencia térmica y la irradiancia en colectores solares de un cilindro parabólico.

Como tercer eje se encuentra la conversión de energía y la eficiencia en sistemas computacionales con contribuciones sobre un convertidor elevado en cascada para celdas de combustible de hidrógeno y estrategias de software verde que evalúa el impacto energético del diseño algorítmico y código como una responsabilidad ecológica en el desarrollo de software.

Finalmente, se incorpora un artículo enfocado al riesgo financiero y los mercados sustentables, evaluando las restricciones de sostenibilidad en portafolios accionarios en México a partir de pilares ambientales, sociales, y de gobernanza.

Más allá de los resultados técnicos y los modelos matemáticos presentados, los artículos aquí publicados constituyen un testimonio de la búsqueda colectiva por equilibrar el aprovechamiento tecnológico con la protección de recursos. Los autores comparten una visión común sobre la ciencia como instrumento y el bienestar humano como fin.

Invitamos a la comunidad académica, científica y a los profesionales en tecnología a explorar estas páginas del Número 2 del Volumen 10 de **Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability** para reflexionar sobre nuestro papel en la construcción de un futuro donde la técnica y la humanidad coexistan en armonía.

Editora asociada invitada

Dra. Zaira Ruth Zuviría López

Universidad Autónoma de Guadalajara

zzuviria@edu.uag.mx

Integración de calor en la purificación de ciclohexano grado textil utilizando etilenglicol como solvente

Heat integration in the textile grade cyclohexane purification using ethylene glycol as a solvent

Cruz-Valdez J.A.^{1*}, Álvarez-Alor B.², Montalvo-Salinas D.³, Garzón-Pérez A.S.⁴, Alvarado-Méndez P.E.⁵

^{1,2,3,4,5}Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, División de Ingeniería Química, Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km. 16.5, 96536, Coatzacoalcos, Ver., México.

*jcruzv@itesco.edu.mx

Artículo Científico

Publicado: 31 agosto 2026

RESUMEN

El ciclohexano (CHX) es la principal materia prima para la producción de Nylon-6 y Nylon-66, dos de las fibras sintéticas más importantes para la elaboración de textiles. Entre el 80-85 % de la producción mundial de CHX se obtiene a través de la hidrogenación catalítica de benceno (BEN). Sin embargo, debido a similitudes en sus estructuras químicas y temperaturas de ebullición, a 77 °C y 1 atm la mezcla CHX-BEN forma un azeótropo con una composición del 55 mol% BEN; imposibilitando su purificación por destilación convencional. Como consecuencia, la destilación extractiva (ED) surge como una alternativa de purificación. Debido a su alta polaridad, baja toxicidad, y bajo costo, el etilenglicol (EG) fue seleccionado como solvente en la simulación del proceso de ED en Aspen Plus V14®. El uso de EG resultó adecuado para la obtención de CHX y BEN con purezas del 99.90 mol%, respectivamente. Donde, en comparación con el uso de sulfolano (SF) como solvente, nuestro proceso de ED utilizando EG representa un ahorro energético del 11.30 %. Con el objetivo de reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂, un proceso de destilación extractiva con integración de calor (EDHI) fue propuesto; donde, en comparación con el proceso convencional de ED utilizando EG, una integración de calor minimiza en un 24.37 % las emisiones de CO₂. Nuestros resultados demuestran que, el uso de EG como solvente en un proceso de EDHI favorece a la obtención de CHX grado textil de forma económica y sustentable.

Palabras clave: etilenglicol, destilación extractiva, ciclohexano, integración de calor, ahorro energético.

ABSTRACT

Cyclohexane (CHX) is the main raw material for the production of Nylon-6 and Nylon-66, two of the most important synthetic fibers for the manufacture of textiles. Between 80-85 % of the world's CHX production is obtained through the catalytic hydrogenation of benzene (BEN). However, due to similarities in their chemical structures and boiling points, at 77 °C and 1 atm the CHX-BEN mixture forms an azeotrope with a composition of 55 mol% BEN; making it impossible to purify by conventional distillation. As a result, extractive distillation (ED) emerges as a purification

alternative. Due to its high polarity, low toxicity, and low cost, ethylene glycol (EG) was selected as the solvent in the ED process simulation on Aspen Plus V14®. The use of EG proved suitable for obtaining CHX and BEN with purities of 99.90 mol%, respectively. Where, compared to the use of sulfolane (SF) as a solvent, our ED process using EG represents an energy saving of 11.30 %. Our results demonstrate the high effectiveness of EG as a solvent in the purification of the CHX-BEN mixture. With the objective of reducing energy consumption and CO₂ emissions, an extractive distillation process with heat integration (EDHI) is proposed; where, compared to the conventional ED process using EG, heat integration minimizes CO₂ emissions by 24.37%. Our results demonstrate that the use of EG as a solvent in an EDHI process favor the economical and sustainable production of textile-grade CHX.

Keywords: ethylene glycol, extractive distillation, cyclohexane, heat integration, energy saving.

INTRODUCCIÓN

El Nylon es la primera fibra sintética creada por el ser humano, siendo descubierta en 1935 por el químico estadounidense Wallace Hume Carothers, cuando este se encontraba trabajando para el gigante multinacional Du Pont de Nemours. El Nylon es clasificado de acuerdo con sus estructuras químicas y diversas aplicaciones, siendo los más utilizados el Nylon-6 y el Nylon-66. El Nylon-6 se utiliza con frecuencia para la elaboración de textiles, y el Nylon-66 para la fabricación de neumáticos. Ambos tipos de Nylon tienen una característica en común, su origen proviene de los hidrocarburos cíclicos.

El ciclohexano (CHX) es la principal materia prima para la producción de Nylon-6 y Nylon-66 [1]; del cual, se estima que entre el 80-85 % de la producción global de CHX se obtiene por hidrogenación catalítica de benceno (BEN) [2]. Aproximadamente, el 54 % de la producción total anual de CHX es utilizado para la síntesis de ácido adípico [3], el 39 % es ocupado para la síntesis de ϵ -caprolactama [3]; mientras que, el 7 % restante es empleado para la elaboración de solventes, insecticidas y plastificantes [3]. Globalmente, la capacidad total anual de producción de CHX es de aproximadamente 1800 millones de galones [5]; de los cuales, Estados Unidos representa 600 millones [3].

En la **Figura 1**, con flechas en color negro, se muestra el proceso de obtención de Nylon-6. En este caso, el CHX (2) obtenido a partir de la hidrogenación total de BEN (1) debe ser purificado; dado que, el CHX grado textil debe tener una pureza ≥ 99.9 mol%. Posteriormente, el CHX es oxigenado, produciendo una mezcla de ciclohexanol (3) y ciclohexanona (4); donde, la ciclohexanona es purificada mediante un proceso de destilación y, al reaccionar con ácido sulfúrico (H₂SO₄) favorece a la obtención de ϵ -caprolactama (5) [4]. Finalmente, una reacción térmica permite la obtención Nylon-6 (6). Por otra parte, con flechas en color azul, se muestra el proceso para la obtención de Nylon-66 (9); donde, partiendo de la mezcla ciclohexanol-ciclohexanona, al ocurrir una reacción de oxidación en presencia de ácido nítrico (HNO₃) se obtiene ácido adípico (7) [5]. Posteriormente, el ácido adípico reacciona con 1,6-diaminohexano (8) en agua y, vía reacción de policondensación se obtiene el Nylon-66.

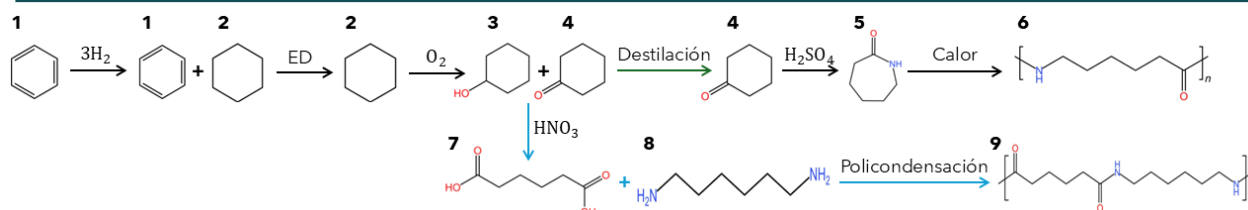


Figura 1. Ruta cinética tradicional para la producción de Nylon-6 (6) y Nylon-66 (9) utilizando ciclohexano (2) como materia prima.

Debido a que el equilibrio químico de la reacción de hidrogenación catalítica de BEN se encuentra limitado, no todo el BEN logra ser convertido en CHX [1]; por lo tanto, a la salida del reactor existe una mezcla CHX-BEN. A causa de sus estructuras químicas similares, y una diferencia de 0.65 °C en sus temperaturas de ebullición [6], a 1 atm y 77 °C la mezcla CHX-BEN forma un azeótropo homogéneo con una composición del 55 mol% BEN [6]. Por lo tanto, su separación por destilación binaria convencional de la mezcla CHX-BZ es imposible.

Existen dos técnicas importantes para la purificación de la mezcla CHX-BEN dependiendo del contenido de BEN en esta; la extracción líquido-líquido (LLE) se utiliza para concentraciones entre 20-25 wt%, y la destilación extractiva (ED) para niveles entre 65-90 wt% [6]. La ED es una de las metodologías más utilizadas para la separación de mezclas azeotrópicas [6]. Esta técnica consiste en añadir un solvente a la mezcla problema, modificando el coeficiente de actividad del componente clave ligero, aumentando la volatilidad relativa del sistema [6].

Li et al. [7] utilizaron sulfolano (SF) como solvente en procesos de ED para la purificación de una mezcla equimolar de 100 kmol/h de CHX-BEN, obteniendo purezas del 99.9 mol% para ambos componentes. Zhang et al. [8] realizaron un proceso híbrido de LLE-ED utilizando como solvente al líquido dicatiónico (65 mol% [C₅(MIM)₂][NTf₂]₂ + 35 mol% H₂O), para la purificación de una mezcla equimolar de 100 kmol/h de CHX-BEN, obteniendo CHX y BEN con purezas del 99.9 y 99.6 mol%, respectivamente.

La correcta selección del solvente, también conocido como agente de separación másico, es desafiante; dado que, este debe ser económico, biodegradable, no-inflamable, no-tóxico, no-volátil y de una elevada polaridad [6]. No obstante, a pesar de que el SF es el solvente orgánico más utilizado para la desaromatización de hidrocarburos, es un compuesto altamente tóxico, inflamable, puede corroer equipos [9], y su presencia contamina cuerpos de agua [9]. Así mismo, los líquidos iónicos (ILs) son altamente viscosos y densos [10], su naturaleza higroscópica puede causar corrosión [10], y su producción es costosa [10]. De acuerdo con la literatura [6], el etilenglicol (EG), utilizado como anticongelante para automóviles, es un líquido incoloro, económico, altamente disponible en el mercado, y con poca toxicidad [6]; por lo tanto, es presentado como solvente en una comparación directa con el uso de SF en la desaromatización del CHX.

Por otra parte, los procesos de destilación representan un elevado consumo energético en las industrias. Por lo tanto, con el objetivo de maximizar la eficiencia termodinámica, y minimizar el consumo energético, económico y de emisiones de CO₂ en los procesos de ED, el diseño de

procesos de destilación extractiva con integración de calor (EDHI) ha ganado importancia en los últimos años [7,8]. Hoy en día, no se ha reportado el uso de procesos de EDHI utilizando EG para la desaromatización de CHX.

Debido a todo lo anteriormente mencionado, el objetivo de este trabajo es utilizar al EG como solvente en la simulación del proceso de ED, en Aspen Plus V14®, para la obtención de CHX y BEN con purezas ≥ 99.90 mol%, respectivamente, y logrando una recuperación de solvente ≥ 99.99 mol%. Primeramente, un análisis de los diagramas pseudobinarios del equilibrio líquido vapor (VLE), así como la estimación de las volatilidades relativas, permitirán establecer la viabilidad del EG como agente de separación másico respecto del uso de SF. Posteriormente, un algoritmo de optimización iterativo es utilizado para la selección de las variables de diseño del proceso convencional de ED. Finalmente, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂, el consumo energético y económico en el proceso de ED utilizando EG, un proceso de EDHI es propuesto.

METODOLOGÍA

Equilibrio líquido-vapor (VLE). De acuerdo con la literatura, el modelo termodinámico NRTL ha sido ampliamente utilizado en la simulación de los sistemas CHX + BEN + solvente [1,6-8]. En este caso, los parámetros de interacción binarios NRTL de los sistemas CHX + BEN + {EG/SF} fueron estimados en Aspen Plus V14®.

La **Figura 2** muestra el impacto del EG y del SF en el diagrama pseudobinario del VLE de la mezcla CHX-BZ a 1 atm utilizando Aspen Plus Properties V14®. En este caso, se observa que el EG y el SF tienen la capacidad de romper el punto azeotrópico, aumentando la volatilidad relativa del CHX, y facilitando a su obtención como producto de destilado con elevadas purezas. Debido a la elevada polaridad del EG, así como a la presencia de electrones π en las moléculas de BEN, las cuales le confieren una mayor polaridad al BEN en comparación con el CHX [6], la miscibilidad del BEN en el EG es elevada, facilitando a la extracción del BEN y fácil evaporación del CHX. Como consecuencia, cuando utilizamos EG como solvente, la columna extractiva tendrá una menor cantidad de etapas en comparación con el uso de SF.

La **Figura 3** representa el efecto de la presión en el VLE del sistema BEN + {EG/SF}; donde, a 0.2 atm la volatilidad relativa del BEN es superior que a 1 atm. De acuerdo con la literatura, a presiones inferiores a 1 atm, la volatilidad relativa aumenta, debido a la disminución en las temperaturas de ebullición [11]. Adicionalmente, la volatilidad relativa del BEN es ligeramente más grande en presencia del SF, en comparación con el EG; esto se debe a que, la solubilidad del BEN es mucho mayor en el EG que en el SF [6], por lo tanto, es más fácil destilar al BEN del SF. Como consecuencia, la columna de recuperación del solvente será mucho más pequeña cuando utilizamos SF.

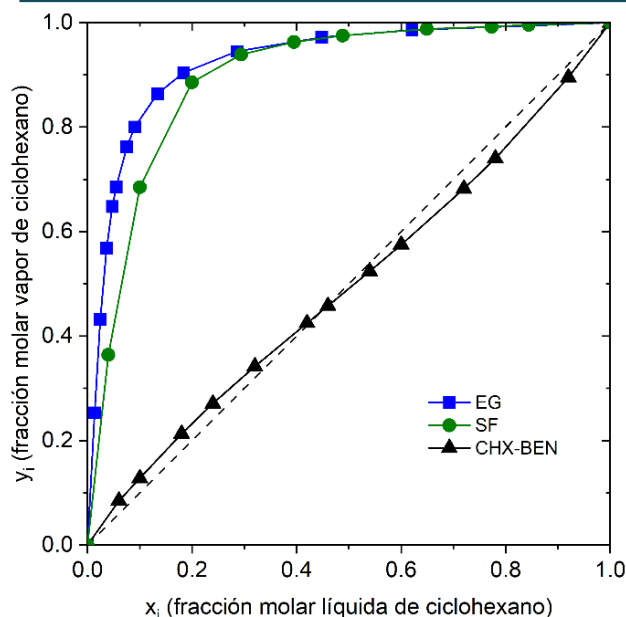


Figura 2. Efecto del EG y del SF en el VLE del sistema CHX-BEN a 1 atm.

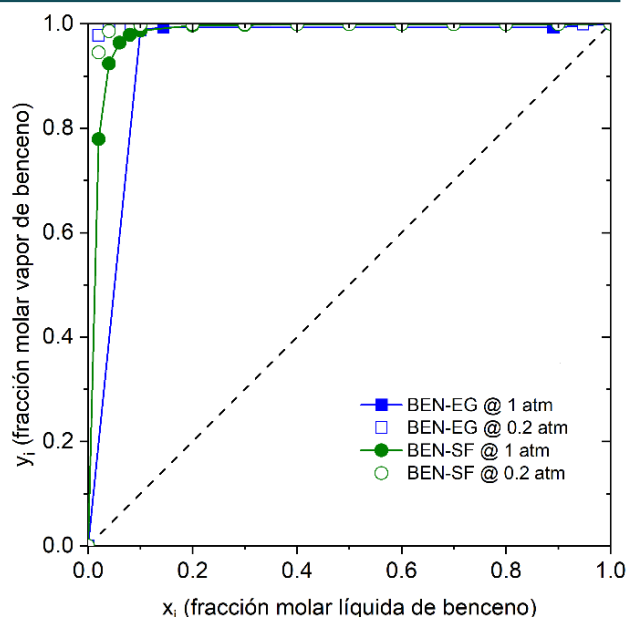


Figura 3. Efecto de la presión en el VLE de los sistemas BEN-EG y BEN-SF.

Volatilidad relativa. El solvente tiene como objetivo modificar el coeficiente de actividad del componente clave ligero, CHX, incrementando su volatilidad y facilitando su separación [11]. La Ecuación (1) es utilizada para estimar la volatilidad relativa de un sistema. Donde, los subíndices *i* y *j* representan al CHX y al BEN, respectivamente; mientras que, *x* y *y* representan las fracciones molares de los componentes en las fases líquidas y de vapor, respectivamente [6,11].

$$\alpha_{ij} = \frac{y_i/x_i}{y_j/x_j} \quad (1)$$

La **Tabla 1** muestra las volatilidades relativas de los sistemas CHX + BEN + {EG/SF} a 1 atm y diferentes relaciones solventes/mezcla azeotrópica (S/F). En Aspen Plus V14® se simuló el efecto del solvente en un separador flash. Los resultados confirman que el uso de EG y SF aumenta la volatilidad relativa del CHX. Así mismo, a relaciones S/F ≥ 2 , el SF presenta un ligero aumento en la volatilidad, en comparación con el EG. Esto se debe a que, el CHX tiende a incrementar ligeramente su miscibilidad en presencia de altas concentraciones de EG, caso contrario con el SF. Sin embargo, altas relaciones S/F provocan un elevado consumo de energía en los rehervidores, y por ende, los costos operativos y de capital de inversión incrementan. Debido a esto, se concluye que relaciones S/F ≤ 2 resultan adecuadas para el diseño del proceso de ED.

Tabla 1. Efecto de la relación S/F en la volatilidad relativa (α_{ij}) del sistema CHX-BEN a 1 atm.

S/F	EG	SF
	α_{ij}	α_{ij}
1	3.88	3.53
1.5	5.42	5.35
2	7.13	7.46
2.5	9.04	9.82

Diseño del proceso de destilación extractiva (ED). La **Figura 4** muestra el esquema del proceso convencional de ED para la purificación de la mezcla CHX-BEN utilizando EG y SF como solventes. Las simulaciones del proceso de ED fueron desarrolladas en Aspen Plus V14® utilizando el módulo RadFrac y el modelo termodinámico NRTL [6]. Donde, un flujo de 100 kmol/h a 80 °C y 1.0 atm, con composiciones equimolares de CHX y BEN (**F**), es alimentado en la sección media (**N_F**) de la columna de destilación extractiva (EDC) [6]. La presión de operación de la EDC es 1 atm. El flujo de EG y SF, como agentes de separación másicos (**S**) es introducido a 1 atm y 65 °C entre las etapas 2 y 6 (**N_S**) de la EDC, esto con el objetivo de asegurar su presencia en la fase líquida a lo largo de toda la columna [6], promoviendo a la extracción de BEN en el fondo, mientras el CHX es obtenido con purezas ≥ 99.90 mol% como producto de destilado en **D₁**. La mezcla BEN+{EG/SF} obtenida como producto de fondo de la EDC (**B₁**), es alimentada en la sección media (**N_{B1}**) de la columna de recuperación (RC).

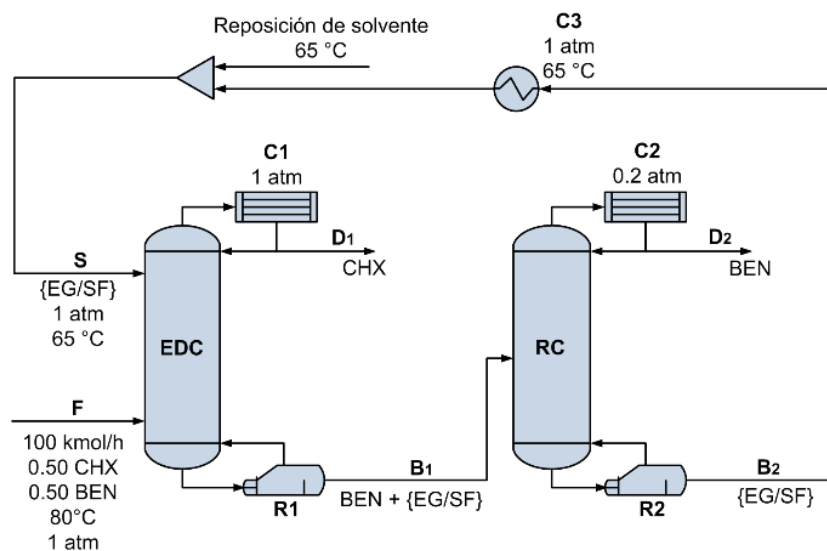


Figura 4. Esquema del proceso convencional de ED para la purificación de la mezcla CHX-BEN.

De acuerdo con los resultados de la Figura 3, la volatilidad relativa del BEN respecto del EG y SF, incrementa cuando la presión decrece a 0.2 atm. Por otra parte, debido a que el EG y el SF tienen temperaturas de ebullición elevadas, operar la RC a 1 atm puede resultar en un aumento sustancial en las cargas de calor en el rehedivdor R2 [11]; mientras que, a 0.2 atm el consumo de energía disminuye, minimizando el uso de vapor de vapor de calefacción, y por ende, los costos de

operación del proceso [6,11]. Cruz Valdez et al. [11] demostraron que, para la desaromatización de hidrocarburos, una presión de operación < 0.2 atm, ocasiona que la temperatura de operación del condensador C2 sea < 35 °C, requiriendo un elevado consumo de refrigerante. Adicionalmente, operar la RC a presión de vacío reduce la temperatura de operación del rehervidor R2, previniendo la descomposición térmica de los solventes [6,11]. Por lo tanto, la RC opera a 0.2 atm. Así mismo, la obtención de BEN con purezas ≥ 99.90 mol% como producto de destilado en D_2 facilita a la recuperación de EG y SF con purezas ≥ 99.99 mol% en B_2 .

Optimización del proceso de ED. La optimización secuencial iterativa es una metodología ampliamente utilizada en la optimización de procesos de ED y LLE-ED [6-8,11], teniendo como objetivo establecer los valores óptimos de cada variable de decisión, mientras es minimizado el consumo energético y el Costo Total Anual (TAC) [6-8,11]. Esta técnica implica la optimización de un solo factor; donde, cada variable de decisión es optimizada de manera iterativa, ajustando una variable a la vez, mientras las demás variables se mantienen constantes [6-8,11].

La **Figura 5** muestra el algoritmo de optimización iterativo utilizado en este trabajo; donde, la minimización del consumo energético en los rehervidores de las EDC (Q_{R1}) y RC (Q_{R2}), sirve como criterio para establecer los parámetros óptimos de las variables de decisión [6,11]. Las purezas deseadas de CHX en D_1 ($x_{D_1}^{CHX}$), BEN en D_2 ($x_{D_2}^{BEN}$), y solvente {EG/SF} en B_2 ($x_{B_2}^S$), definidas en las Ecuaciones (2)-(4), son establecidas como especificaciones de diseño o restricciones.

$$x_{D_1}^{CHX} \geq 99.90 \text{ mol\%} \quad (2)$$

$$x_{D_2}^{BEN} \geq 99.90 \text{ mol\%} \quad (3)$$

$$x_{B_2}^S \geq 99.99 \text{ mol\%} \quad (4)$$

Las variables de decisión seleccionadas en este trabajo son: el flujo de EG o SF (S), la etapa de alimentación del flujo de EG o SF (N_S), la etapa de alimentación de la mezcla CHX-BEN (N_F), y la etapa de alimentación de la mezcla BEN-EG (N_{B_1}). Los flujos D_1 y D_2 se mantuvieron constantes durante la optimización. Las relaciones de reflujo molar de la EDC (RR_1) y de la RC (RR_2), fueron ajustadas para mantener las concentraciones deseadas de CHX y BEN en los flujos D_1 y D_2 , respectivamente, utilizando la función “Design Spec/Vary” en Aspen Plus V14® [6,11]. Los límites inferiores y superiores de las variables discretas (N_S , N_F , y N_{B_1}) y continuas (S , RR_1 , y RR_2) fueron definidos utilizando del módulo “Sensitivity Analysis” en Aspen Plus V14® [6,11]. Los números totales de etapas de la EDC (N_{TEDC}) y de la RC (N_{TRC}) fueron previamente determinados, y no fueron considerados en el análisis de sensibilidad.

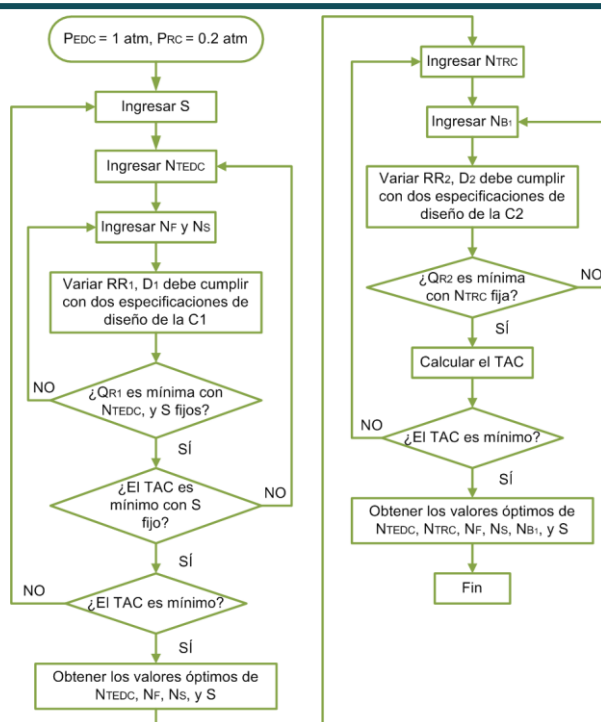


Figura 5. Algoritmo de optimización iterativo del proceso convencional de ED.

Diseño del proceso de destilación extractiva con integración de calor (EDHI). A causa de las elevadas temperaturas de ebullición de los solventes, la temperatura en el fondo de la RC es superior respecto de la EDC. Por lo tanto, el aprovechamiento del calor sensible del flujo B_2 permite precalentar la corriente B_1 ; y de esta forma, la carga de calor en el rehervidor R2 es reducida. Como consecuencia, el consumo energético, el TAC, y las emisiones de CO₂ son minimizadas. La Figura 6 muestra el esquema de nuestro proceso de EDHI. En este caso, el intercambiador de calor (HEX) de nuestro proceso de EDHI es diseñado con una diferencia mínima de temperaturas de 10 K entre la salida de la corriente caliente, y la entrada de la corriente fría. Adicionalmente, en esta metodología la mayoría de las variables de diseño del proceso convencional de ED se conservan [7]. El uso de esta metodología de integración de calor es más sencillo que la implementación de rehervidores laterales o técnicas de acoplamiento térmico [7,8].

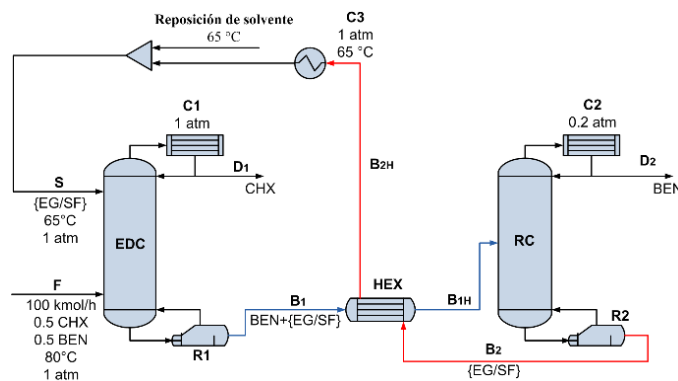


Figura 6. Esquema del proceso propuesto de EDHI para la separación de la mezcla CHX-BEN.

Análisis económico y ambiental. La Ecuación (5) es ampliamente utilizada para la estimación del TAC; el cual, sirve como un indicador económico que permite evaluar la viabilidad económica de procesos de ED y LLE-ED [6-8,11]. Los Costos Totales de Operación (*TOC*) conforman los costos relacionados con electricidad, vapor de calentamiento en los rehervidores, refrigerante, y agua de enfriamiento en los condensadores y enfriadores [6]. Los *TOC* son estimados considerando 8000 h de operación al año [6-8]. Por otra parte, el Capital Total de Inversión (*TCI*) comprende los costos asociados con las columnas de destilación (EDC y RC), condensadores (C1 y C2), rehervidores (R1 y R2), enfriadores (C3), e intercambiadores de calor (HEX). Componentes como tuberías, válvulas y bombas, generan un impacto económico relativamente pequeño, por lo que son excluidos del cálculo [6,11]. El periodo de retorno del *TCI* (θ) se establece a 3 años [6-8].

$$TAC [\$/año] = TOC + \frac{TCI}{\theta} \quad (5)$$

Las emisiones de CO₂ sirven como un indicador en la evaluación del impacto ambiental y sustentabilidad de un proceso [12]. Las emisiones de CO₂ están directamente relacionadas con el consumo de vapor de calentamiento en los rehervidores; el cual, es generado a partir de gas natural, carbón o combustibles fósiles pesados [13]. La Ecuación (6) es comúnmente utilizada para la cuantificación de emisiones de CO₂ [kg/h] [6]; donde, $\alpha = 3.67$ representa la relación de masas molares de CO₂ a C, Q_{fuel} [kW] es la cantidad de combustible quemado, NHV es el valor de calentamiento neto, y C% es el contenido de carbono. Si se utiliza gas natural como combustible, el NHV y C% tienen valores de 51,000 kJ/kg y 0.754 kg/kg, respectivamente [6].

$$CO_2[kg/h] = \left(\frac{Q_{fuel}}{NHV}\right) \left(\frac{C\%}{100}\right) \alpha \quad (6)$$

La Ecuación (7) permite calcular Q_{fuel} , siendo Q_{proc} [kW] la carga térmica total del proceso, y λ_{proc} [kJ/kg] y h_{proc} [kJ/kg] son el calor latente y la entalpía del vapor de calentamiento, respectivamente; adicionalmente, T_0 , T_F , y T_{stack} son las temperaturas de referencia, flama y stack, respectivamente [6,11].

$$Q_{fuel} = \left(\frac{Q_{proc}}{\lambda_{proc}}\right) (h_{proc} - 419) \left(\frac{T_F - T_0}{T_F - T_{stack}}\right) \quad (7)$$

RESULTADOS

En la **Figura 7** se ilustra el efecto del flujo de EG en la obtención de CHX como producto de destilado en la EDC. Un flujo de EG ≥ 184 kmol/h favorece a la obtención de CHX con purzas ≥ 99.90 mol%. Sin embargo, esto provoca un aumento en el consumo energético de los rehervidores R1 y R2; dado que, una mayor cantidad de solvente debe ser calentada para lograr la separación correcta de CHX y BEN en D_1 y D_2 , respectivamente. Adicionalmente, el comportamiento de las purzas de CHX concuerda con lo descrito en el cálculo de las volatilidades relativas; donde, a relaciones S/F cercanas a 2 una parte del CHX tiende a miscibilizar con el EG. Por otra parte, un flujo de EG < 184 kmol/h fomenta al aumento de RR_1 y RR_2 , debido a que no se cumple con las

concentraciones deseadas de CHX, y BEN en la EDC y en la RC, respectivamente; como consecuencia, existe un aumento en las cargas de calor de R1 y R2. Por lo tanto, un flujo de 184 kmol/h de EG resulta apropiado.

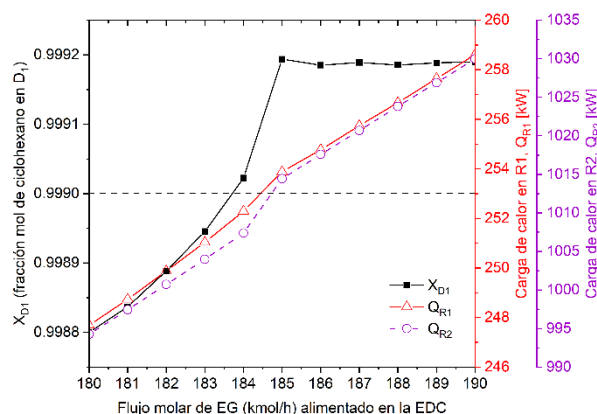


Figura 7. Efecto del flujo de EG en la pureza de CHX y consumo energético en R1 y R2.

La **Tabla 2** muestra una comparación de los resultados de las variables de diseño de los procesos de ED utilizando EG y SF. Donde, el uso de EG, en comparación con el SF, promueve a que la EDC tenga menos etapas de separación; sin embargo, en presencia de SF la RC es más pequeña, concordando con las conclusiones de los diagramas pseudobinarios y binarios del VLE descritos en la sección anterior. Adicionalmente, en ambos casos se logra la obtención de CHX y BEN con purezas del 99.90 mol%, cumpliendo con los estándares necesarios para la producción de CHX grado textil [1,3].

Debido a la naturaleza tóxica y altamente cancerígena del BEN, y con el objetivo de evitar la contaminación del solvente antes de ser recirculado a la EDC, este debe contener como máximo impurezas de BEN ≤ 300 ppm [14]. En este contexto, se logra una recuperación de solvente con purezas del 99.99 mol%, existiendo la presencia de 12.60 ppm y 123.80 ppm de BEN cuando se utiliza SF y EG, respectivamente. En ambos casos, se cumple con los límites permitidos de impurezas de BEN. Estas impurezas ocasionan una reposición de solvente fresco de 0.003 kmol/h de SF, y 0.018 kmol/h de EG. Si bien, la reposición de solvente es mínima, se necesita ligeramente una mayor cantidad de EG que de SF, esto debido a la alta capacidad de miscibilidad del BEN con el EG, descrita anteriormente.

Los objetivos principales del diseño de procesos de EDHI es reducir el TAC a partir de la minimización en las cargas de calor en los rehervidores, y por ende, un decrecimiento en los costos de vapor de calentamiento suministrados, y en las emisiones de CO₂. En este caso, a pesar de que la temperatura de ebullición del EG a 0.2 atm es de 149.74 °C, el uso de vapor de presión media es utilizado como fuente de calentamiento en el R2 de la RC. Adicionalmente, el uso de un flujo elevado de EG como solvente en la EDC, así como la baja temperatura de alimentación del flujo B_1 en la RC, causan un elevado consumo de energía en R2. La baja temperatura del flujo de fondo B_1 es una característica de las EDC, como consecuencia de la temperatura de ebullición del CHX.

Tabla 2. Comparación de los procesos de ED en la desaromatización de CHX utilizando EG y SF.

Parámetros		Solventes	
		EG	SF
EDC	$N_{T_{EDC}}$	14	15
	S [kmol/h]	184	166
	N_S	3	3
	N_F	10	10
	RR_1	1.18	0.61
	$x_{D_1}^{CHX}$	0.9990	0.9990
	Q_{C1} [kW]	-905.141	-668.481
	Q_{R1} [kW]	252.952	385.495
RC	$N_{T_{RC}}$	8	6
	N_{B_1}	6	3
	RR_2	0.18	0.15
	$x_{D_2}^{BEN}$	0.9990	0.9990
	$x_{B_2}^S$	0.9999	0.9999
	Q_{C2} [kW]	-545.487	-539.628
	Q_{R2} [kW]	1011.31	1462.17
	Q_{C3} [kW]	-746.662	-1572.6

La **Figura 8** muestra los resultados del proceso de EDHI utilizando EG como solvente. En este caso, no existe modificación en las variables de diseño de la RC. En comparación con el proceso de ED, el uso de un intercambiador de calor (HEX) para la transferencia de calor sensible entre las corrientes B_1 y B_2 , permitió calentar al flujo B_1 de 77.64 °C a 88.0 °C, favoreciendo a una disminución energética de 1011.31 kW a 700.323 kW en R2. Mientras que, la corriente B_2 disminuyó su temperatura de 149.17 °C a 115.77 °C, minimizando la energía de enfriamiento de -746.662 kW a -434.82 kW en C3.

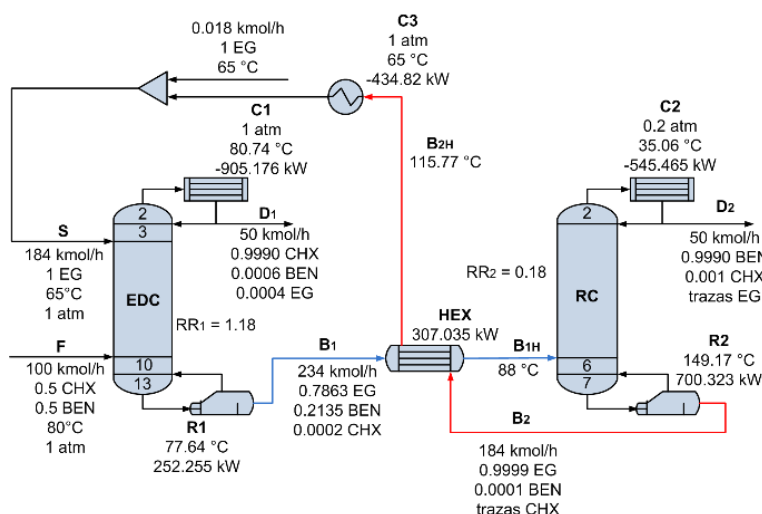


Figura 8. Esquema del proceso de EDHI utilizando EG como solvente.

La **Figura 9** muestra el proceso de EDHI que utiliza SF como solvente; donde, la integración de calor provoca un aumento de 113.62 °C a 123.5 °C en la temperatura del flujo B_1 , permitiendo una

disminución de 1462.17 kW a 1267.04 kW en R2. Por otra parte, RR_2 adquirió un valor de 0.23, con la finalidad de obtener BEN y SF con purezas del 99.90 mol% y 99.99 mol%, respectivamente; por lo tanto, existe un aumento de -539.628 kW a -576.833 kW en C2. Sin embargo, la transferencia de energía entre B_2 y B_1 provocó que la temperatura del flujo B_2 disminuyera de 221.24 °C a 199.76 °C, minimizando de -1572.6 kW a -1340.26 kW la carga de calor en C3.

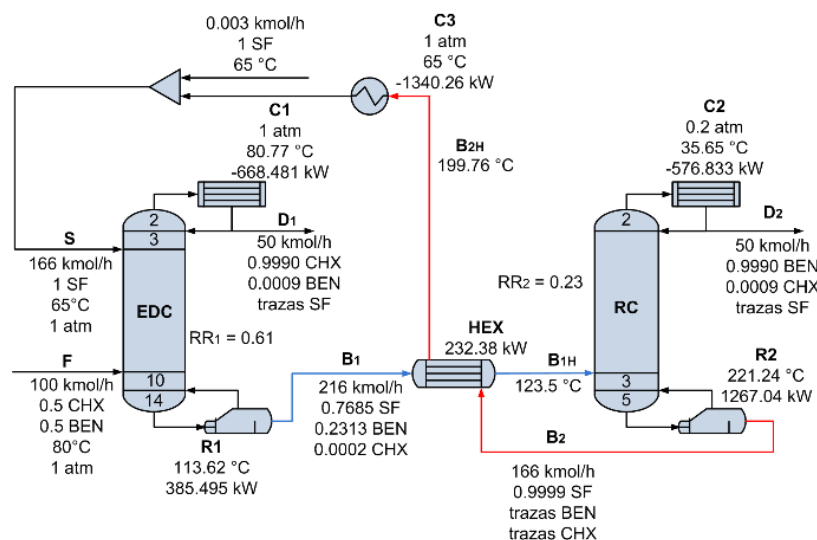


Figura 9. Esquema del proceso de EDHI utilizando SF como solvente.

La **Figura 10** muestra una comparativa del consumo energético total de nuestros procesos de ED y EDHI; donde, el proceso de ED que utiliza EG genera un consumo energético total de 2710.30 kW, presentando un ahorro del 11.31 % en comparación con el proceso de ED que utiliza SF. Por otra parte, el proceso de EDHI que utiliza EG presenta un gasto total de energía de 2403.881 kW, mostrando un decrecimiento energético del 11.31 % y del 21.33 % respecto de los procesos de ED que usan EG y SF, respectivamente; mientras que, en comparación con el proceso de EDHI que emplea SF, existe una disminución del 17.04 %. Dichos resultados demuestran que el correcto aprovechamiento del calor sensible del flujo de solvente recuperado ayuda a minimizar el consumo de energía en el rehervidor R2.

La **Figura 11** muestra las emisiones de CO₂ generadas en nuestros procesos de ED y EDHI utilizando EG y SF. Donde, el uso de EG en el proceso de ED genera 268.28 kg/h de CO₂, presentando una reducción del 31.83 % en comparación con el proceso de ED que usa SF. Por otra parte, el proceso de EDHI usando EG produce 202.89 kg/h, siendo una minimización del 42.35 % en comparación con el uso de SF en el proceso de EDHI. La generación de bajas cantidades de contaminantes atmosféricos al utilizar EG está directamente relacionada con el aumento de la volatilidad relativa del sistema CHX-BEN en la EDC; dado que, a mayor volatilidad, la separación es más fácil, y por ende, se necesita menos energía en el reboiler R1 para separar los componentes. Así mismo, la reducción en la temperatura de ebullición del EG debido al uso de una presión de operación de 0.2 atm en la RC, ocasionó una disminución en la energía de calentamiento en el R2. Adicionalmente, una apropiada integración de calor, calentando la corriente fría B_1 , favoreció a

una reducción del 11.31 % en el consumo de energía, y una minimización del 24.37 % en emisiones de CO₂ respecto del uso de EG en el proceso convencional de ED.

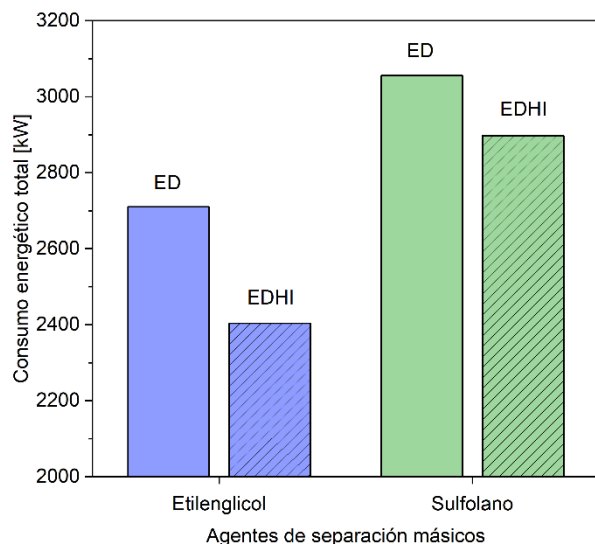


Figura 10. Consumo energético de los procesos de ED y EDHI.

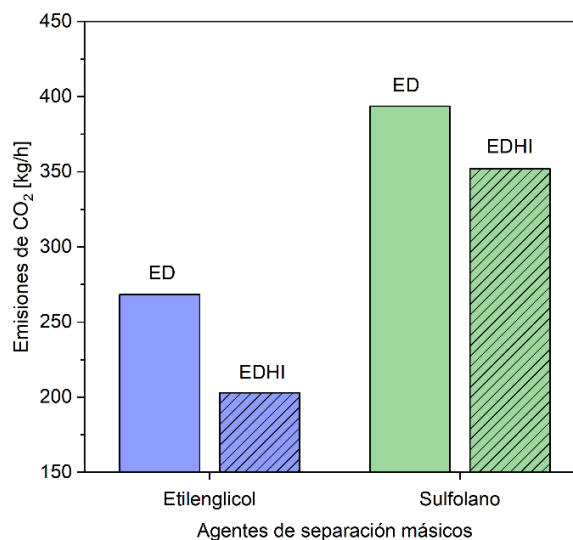


Figura 11. Emisiones totales de CO₂ generadas en los procesos de ED y EDHI.

En la **Figura 12** se muestra una comparación del TAC de los procesos de ED y EDHI utilizando EG y SF para la purificación de la mezcla CHX-BEN. Los costos totales de operación (TOC) y costos totales de capital de inversión (TCI) de nuestro trabajo fueron determinados utilizando el módulo “Economics” en Aspen Plus V14®. Nuestro proceso de EDHI utilizando EG presentó un TAC de \$651.320x10³/año, siendo el menor de todos los procesos; mostrando ahorros del 0.25 % y 8,87 % en comparación con los procesos de ED que utilizan EG y SF solventes, respectivamente. Mientras que, existe una minimización del 11.95 % respecto del proceso de EDHI que utiliza SF. Estos resultados indican que el uso de EG en un proceso de EDHI es viable en los aspectos económicos, energéticos y ambientales.

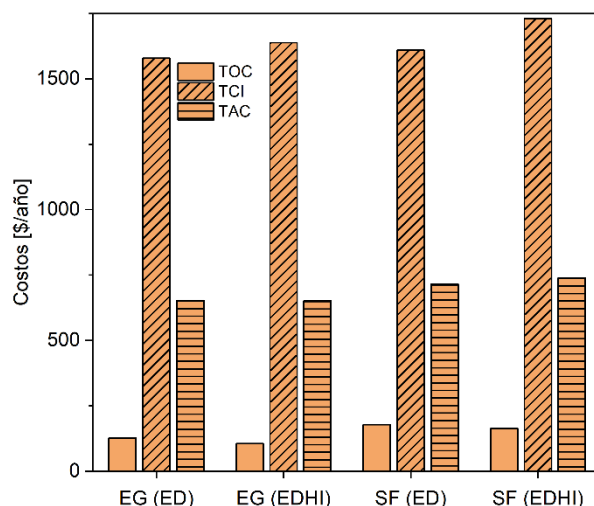


Figura 12. Comparación del TOC, TCI y TAC de los procesos de ED y EDHI.

CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizó EG como alternativa al uso de SF, en el diseño de un proceso de ED para la separación de la mezcla azeotrópica CHX-BEN. Un análisis cualitativo y cuantitativo de los diagramas pseudobinarios y binarios del VLE, así como del cálculo de la volatilidad relativa, respectivamente; demostraron que, el EG es un solvente efectivo para romper el punto azeotrópico e incrementar la volatilidad relativa del CHX a bajas relaciones S/F, esto debido a la alta polaridad y miscibilidad que presenta el BEN en el EG. Posteriormente, el uso de un algoritmo de optimización iterativo, incorporando “Sensitivity Analysis”, permitió establecer los límites inferiores y superiores de las variables de diseño críticas. Esta metodología garantizó la obtención de CHX y BEN con purzas ≥ 99.90 mol%, y una recuperación de EG al 99.99 mol% con 123.80 ppm de BEN residual, cumpliendo con los estándares de impurezas establecidos. Se demostró que el uso de EG en procesos de ED permite ahorros energéticos, en el TAC, y en las emisiones de CO₂ del 11.31 %, 8.63 %, y 31.83 %, respectivamente, en comparación con el proceso de ED que utiliza SF. Por otra parte, con el objetivo de aprovechar el calor sensible de las corrientes calientes del proceso de ED, y minimizar las emisiones de contaminantes atmosféricos, un proceso de EDHI es propuesto, reduciendo las emisiones de CO₂ en un 24.37 % respecto del proceso de ED utilizando EG. De acuerdo con la literatura y los resultados mostrados en este trabajo, el uso de EG, así como el diseño de un proceso de EDHI, son opciones económicas y ambientalmente amigables para la desaromatización de CHX grado textil.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO) por el soporte institucional proporcionado.

REFERENCIAS

- [1] Bak, A., Kozik, V., Dybal, P., Kus, S., Swietlicka, A., & Jampilek, J. (2018). Sulfolane: magic extractor or bad actor? Pilot-scale study on solvent corrosion potential. *Sustainability*, 10, 3677. <https://doi.org/10.3390/su10103677>
- [2] Chen, Y., & Mu, T. (2021). Revisiting greenness of ionic liquids and deep eutectic solvents. *Green Chemical Engineering*, 2, 174-186. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2021.01.004>
- [3] Contreras-Zarazúa, G., Vázquez-Castillo, J. A., Ramírez-Márquez, C., Pontis, G. A., Segovia-Hernández, J. G., & Alcántara-Ávila, J. R. (2017). Comparison of intensified reactive distillation configurations for the synthesis of diphenyl carbonate. *Energy*, 135, 637-649. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.156>

- [4] Cruz Valdez, J. A., Patiño-Herrera, R., Avilés Martínez, A., & Pérez, E. (2024). Separation of the cyclohexane-benzene mixture by the extractive distillation process using ethylene glycol as a solvent. *Chemical Engineering and Processing*, 196, 109686. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109686>
- [5] Cruz Valdez, J. A., Patiño-Herrera, R., Avilés Martínez, A., Barajas-Villarruel, L. R., & Pérez, E. (2025). Energy-economic purification of n-hexane from low benzene concentrations via extractive distillation with propylene carbonate as solvent: a comparative study with liquid–liquid extraction processes. *Separation and Purification Technology*, 36, 131348. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131348>
- [6] Faiq, N. F., Ghifari, A. N., Hafizh, D., Wafi, M. A., & Failasofi, M. N. (2025). Improving cyclohexane yield from hydrogenation benzene with a modified multistage separation design. *Journal of Chemical Engineering Research Progress*, 2(1), 1-13. <https://doi.org/10.9767/jcerp.20295>
- [7] Foppa, L., & Dupont, J. (2015). Benzene partial hydrogenation: advances and perspectives. *Chemical Society Reviews*, 44, 1886-189. <https://doi.org/10.1039/C4CS00324A>
- [8] Gawlig, C., Schindler, S., & Becker, S. (2020). One-pot conversion of cyclohexane to adipic acid using a μ 4-oxido-copper cluster as catalyst together with hydrogen peroxide. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2020(3), 248-252.
- [9] Li, L., Tu, Y., Sun, L., Hou, Y., Zhu, M., Guo, L., Li, Q., & Tian, Y. (2016). Enhanced efficient extractive distillation by combining heat-integrated technology and intermediate heating. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(32), 8837-8847. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b01152>
- [10] Liu, H., Fanf, R., Li, Z., & Li, Y. (2015). Solventless hydrogenation of benzene to cyclohexane over a heterogeneous Ru-Pt bimetallic catalyst. *Chemical Engineering Science*, 122, 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.09.050>
- [11] Sun, L., Wang, Q., Li, L., Zhai, J., & Liu, Y. (2014). Design and control of extractive dividing wall column for separating benzene/cyclohexane mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(19), 8120-8131. <https://doi.org/10.1021/ie500291a>
- [12] Yang, A., Su, Y., Chieng, I. L., Jin, S., Yan, C., Wei, S., & Shen, W. (2019). Investigation of an energy-saving double-thermally coupled extractive distillation for separating ternary system benzene/toluene/cyclohexane. *Energy*, 186, 115756. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.086>
- [13] You, X., Rodríguez-Donis, I., & Gerbaud, V. (2016). Reducing process cost and CO₂ emissions for extractive distillation by double-effect heat integration and mechanical heat pump. *Applied Energy*, 166, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.028>

-
- [14] Zhang, W., Zhao, W., Ren, S., Hou, Y., & Wu, W. (2023). Highly efficient separation of benzene + cyclohexane mixtures by extraction combined extractive distillation using imidazolium-based dicationic ionic liquids. *Green Chemical Engineering*, 4, 312-323. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2022.07.003>

Fotosíntesis artificial efecto sinérgico de Ti^{3+} , Co^{2+} , Co^{3+} en los mecanismos de activación, acoplamiento c-c hacia la producción de isopropanol**Artificial photosynthesis synergistic effect of Ti^{3+} , Co^{2+} , Co^{3+} on the activation mechanisms, c-c coupling towards isopropanol production**

Pérez- de la Cruz A.Y.¹, Montalvo-Salinas D.^{2*}, Cruz-Valdez J.A.¹, Pérez- Francisco J.M.¹, Jiménez- Castillo U.¹, Álvarez-Alor B.³

¹ División de Ingeniería Química. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km. 16.5, Coatzacoalcos 96536, México.

² División de Ingeniería Bioquímica. Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km. 16.5, Coatzacoalcos 96536, México.

³ División de Ingeniería Mecánica, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos, Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km. 16.5, Coatzacoalcos 96536, México.

Artículo Científico**Publicado: 31 de agosto 2026****RESUMEN**

La producción de alcoholes mediante fotosíntesis artificial suele verse limitada por bajas eficiencias de conversión y escasa selectividad. En el presente estudio, se empleó un fotocatalizador de 1% Co/TiO₂ con el objetivo de maximizar la producción de isopropanol mediante la reducción fotocatalítica de CO₂ en presencia de H₂O como agente donador de electrones y, bajo irradiación UV y visible. La caracterización mediante UV-Vis y XPS indicó que la alta actividad catalítica se asocia con la formación de especies de Ti^{3+} , Co^{2+} y Co^{3+} . Estas especies químicas reducen el band gap de TiO₂ y favorecen la separación eficiente de pares electrón-hueco, lo que disminuye la recombinación. Asimismo, mejoran la adsorción y la activación del CO₂ en la superficie del fotocatalizador, lo que promueve la generación de radicales formilos ($\bullet\text{CHO}$), una etapa clave en la ruta mecanística hacia isopropanol.

Palabras clave: Adsorción, alcoholes, CO₂, fotoreducción, 1%Co/TiO₂.

ABSTRACT

The production of alcohols from artificial photosynthesis is often limited by low conversion efficiencies and poor selectivity. In this study, a 1% Co/TiO₂ photocatalyst was used to maximize isopropanol production via the photocatalytic reduction of CO₂ using H₂O as an electron donor and under UV and visible light irradiation. Characterization by UV-Vis and XPS, spectroscopy indicated that the high catalytic activity is related to the formation of Ti^{3+} , Co^{2+} , and Co^{3+} species. These chemical species lower the band gap energy of TiO₂ and promote the efficient separation of electron-hole pairs, thereby reducing their recombination. They also improve the adsorption and activation of CO₂ on the photocatalyst surface, promoting the generation of formyl radicals ($\bullet\text{CHO}$), a key step in the mechanistic pathway to isopropanol.

Keywords: Adsorption, alcohols, CO₂, photoreduction, 1%Co/TiO₂.

INTRODUCCIÓN

El incremento excesivo de los gases de efecto invernadero ha alterado el equilibrio ambiental del planeta, siendo el CO₂ el principal contribuyente al cambio climático y al calentamiento global [1]. Su concentración atmosférica ha aumentado de manera acelerada desde la revolución industrial (280 ppm) [2] como consecuencia directa de la combustión masiva de combustibles fósiles (gas, carbón y petróleo), que aún sostienen la mayor parte de la demanda energética mundial [3]. Este escenario no solo exige reducir emisiones, sino también transformar el CO₂ en un recurso estratégico en un esquema de economía circular del carbono.

En este marco, la fotorreducción catalítica de CO₂ con H₂O, inspirada en la fotosíntesis natural, representa una ruta tecnológica de alto potencial al permitir la conversión directa de energía lumínica en combustibles líquidos. Entre los posible productos, el isopropanol destaca por su elevado índice de octano, alta densidad energética [4–6] y compatibilidad con infraestructuras existentes, lo que lo posiciona como un combustible C₃ de alto valor agregado y como aditivo avanzado para gasolinas.

El TiO₂ ha sido ampliamente empleado como semiconductor fotocatalítico debido a su estabilidad química, bajo costo y disponibilidad, sin embargo, su amplia energía de banda prohibida (3.2 eV) y la rápida recombinación electrón-hueco limitan su aprovechamiento bajo luz visible [7–10]. La modificación con metales de transición, como el cobalto, emerge como una estrategia efectiva para inducir defectos electrónicos, estrechar el band-gap y generar sitios activos que favorezcan la separación de cargas [11].

Los sistemas basados en Co/TiO₂ no solo amplían la respuesta espectral hacia la región visible, sino que también promueven la activación del CO₂ y la estabilización de intermediarios reactivos clave para el acoplamiento C-C, un paso determinante en la formación selectiva de isopropanol. No obstante, alcanzar una alta eficiencia cuántica y selectividad hacia productos C₃ continúa siendo un desafío crítico, estrechamente vinculado al diseño electrónico del fotocatalizador y al control fino de los mecanismos de transferencia de carga interfacial.

PRÁCTICO

Desarrollo de fotocatalizadores Co/TiO₂. Los materiales fotocatalíticos Co/TiO₂ fueron preparados mediante la técnica de impregnación húmeda, empleando TiO₂ (Merk) como soporte y soluciones acuosas de nitrato de cobalto (Co (NO₃)₂·6H₂O, pureza 99,9 %, Merck) como precursor metálico. La cantidad de solución se ajustó estequiométricamente para alcanzar cargas nominales de 1% de cobalto en peso respecto al soporte.

Tras la adición del precursor, la mezcla se sometió a agitación magnética continua durante 30 min a temperatura ambiente, lo que garantizó una distribución homogénea del cobalto en la superficie del TiO₂. Posteriormente, el sólido impregnado se secó a 90 °C durante aproximadamente 2 horas para eliminar el agua. El material seco fue sometido a calcinación a 1000 °C durante 4 h, bajo un

flujo continuo de aire atmosférico ($100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$), lo que favoreció la formación de especies de Co altamente dispersas. La calcinación drástica a 1000°C induce una interdifusión controlada de cationes en la interfaz, provocando de manera intencional una alta densidad de vacancias de oxígeno estables y forzando la estabilización del par redox molecular coordinado superficialmente como sitios aislados ricos en electrones. Esto modifica termodinámicamente la barrera de acoplamiento C-C orientando la selectividad hacia productos de cadena más larga (C_3), al mismo tiempo, reduce el band gap del material obtenido al presentarse la fase de rutilo en TiO_2 . De manera paralela, se preparó una muestra de TiO_2 puro bajo las mismas condiciones térmicas, que se utilizó como referencia experimental.

CARACTERIZACIÓN DE 1%CO/TIO₂

Análisis superficial mediante espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS). La composición química superficial y los estados de oxidación presentes en los fotocatalizadores 1%Co/ TiO_2 , evaluados en la reacción de fotoreducción de CO_2 , fueron determinados mediante espectroscopía de rayos X de fotoelectrones (XPS). Los análisis se realizaron en un espectrómetro Escalab 200R equipado con un analizador hemisférico, operado con energía de paso constante para garantizar una resolución espectral adecuada. La fotoemisión se llevó a cabo empleando radiación monocromática de $\text{Mg K}\alpha$ ($h\nu = 1253.6 \text{ eV}$), generada por un tubo de rayos X configurado a 10 mA y 12 kV. Estas condiciones permitieron obtener señales bien definidas correspondientes a los niveles electrónicos característicos de Co, Ti y O en la superficie del material.

Caracterización óptica mediante espectroscopía UV-Vis. Las propiedades ópticas de los fotocatalizadores se determinaron mediante espectroscopía UV-Vis en modo de reflectancia difusa (DRS). Las muestras fueron analizadas en forma de pastillas compactadas en seco (15 mm de diámetro), empleando un espectrofotómetro Shimadzu UV-2450 equipado con una esfera integradora. El sulfato de bario (BaSO_4) se utilizó como material de referencia para la corrección de la línea base. Los espectros se registraron en el intervalo de 190 a 900 nm a temperatura ambiente. Esta metodología permitió evaluar la capacidad de absorción de radiación en las regiones ultravioleta y visible, una propiedad directamente relacionada con la activación fotoinductiva del sistema durante la actividad fotocatalítica para la reducción de CO_2 .

Determinación de la energía de banda prohibida (E_g) de 1%Co/ TiO_2 . La energía de banda prohibida (E_g) se estimó a partir de los datos obtenidos mediante DRS, considerando que este parámetro representa la energía mínima necesaria para promover un electrón desde la banda de valencia a la de conducción.

Inicialmente, el valor de E_g se calculó mediante la extrapolación lineal del borde de absorción hacia el eje de longitud de onda, aplicando la relación derivada de la ecuación de Planck:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1239.84(\text{eV/nm})}{\lambda(\text{nm})} \quad (1)$$

donde h corresponde a la constante de Planck (4.1357×10^{-15} eV·s), c es la velocidad de la luz (3×10^{17} nm·s⁻¹) y λ a la longitud de onda (nm) asociada al punto de intersección.

Evaluación de la reacción de fotoreducción de CO₂ con H₂O. Los ensayos fotocatalíticos se realizaron en un reactor discontinuo de vidrio Pyrex con un volumen útil de 1 L, equipado con una ventana de cuarzo que garantiza una transmisión eficiente de la radiación UV-Vis. En cada experimento se introdujeron 100 mL de agua y 10 g del fotocatalizador. El sistema se mantuvo a presión atmosférica y a una temperatura controlada de 30 ± 2 °C. Posteriormente, el sistema se expuso a la fuente luminosa seleccionada durante 60 min.

Finalizado el tiempo de reacción, se extrajo una muestra gaseosa de 10 mL para su análisis mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con un espectrofotómetro Bruker Vertex 70. Los espectros fueron adquiridos en modo ATR con una resolución de 4 cm⁻¹ y 150 barridos. Se utilizó helio de alta pureza como gas de referencia. La cuantificación de los productos generados durante la reducción de CO₂ del isopropanol se realizó con el software Grams/AI 7.02.

RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y ESTRUCTURAL DE LOS FOTOCATALIZADORES.

Propiedades ópticas y energía de band gap. La espectroscopía UV-Vis en modo de reflectancia difusa se utilizó para estudiar el comportamiento óptico de los fotocatalizadores y su capacidad de absorción.

En la **Figura 1** se observa que el TiO₂ mostró una absorción predominante en la región ultravioleta (200-400 nm), atribuida a la transición electrónica desde los orbitales O 2p (banda de valencia) hacia los orbitales Ti 3d (banda de conducción)[12]. Tras el dopaje de TiO₂ con Co, se observó un desplazamiento del borde de absorción hacia longitudes de onda más altas, lo que indica una reducción de la brecha de banda prohibida y una extensión de la respuesta óptica hacia la región visible.

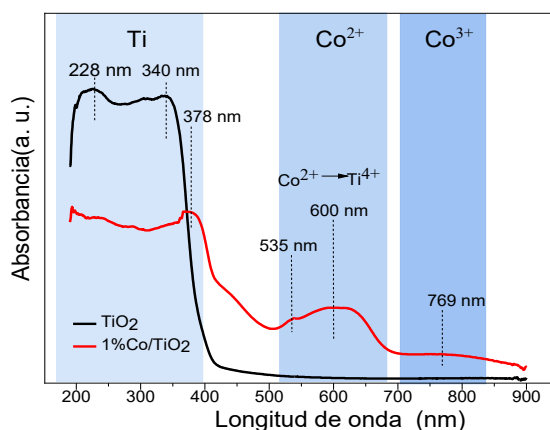


Figura 1. Espectro UV-Vis de de TiO₂ y 1 % Co/TiO₂

Los espectros de los sistemas Co/TiO₂ evidenciaron, además, nuevas bandas en el intervalo de 415-850 nm, asociadas a transiciones electrónicas d-d y a procesos de transferencia de carga entre especies Co²⁺/Co³⁺ y la red de TiO₂. Las absorciones en el rango 535-700 nm pueden asociarse a transiciones características de Co²⁺ en coordinación tetraédrica, mientras que las señales alrededor de 739 nm se asocian con transiciones electrónicas de Co³⁺ en un entorno octaédrico, lo que confirma la coexistencia de ambos estados de oxidación en la superficie catalítica [13].

La energía de Eg se estimó mediante la extrapolación lineal del borde de absorción, utilizando la ecuación de Planck. **Tabla 1.**

Tabla 1. Energía de band gap de los fotocatalizadores estimada según la ecuación de Planck

Fotocatalizador	Eg (eV)		
	Ti ⁴⁺	Co ²⁺	Co ³⁺
TiO ₂	2.97		
1%Co/ TiO ₂	2.72	1.65	1.93

Los valores obtenidos mostraron una disminución de Eg con la presencia de cobalto en la red cristalina de titanio.

Evaluación de la química superficial por espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS).

La estructura electrónica superficial de TiO₂ y del material modificado 1% Co/TiO₂ fue investigada mediante espectroscopía XPS, con el propósito de establecer relaciones entre los estados de oxidación presentes en la superficie y su desempeño en la producción de isopropanol.

El espectro de alta resolución correspondiente a Ti 2p en el TiO₂ sin modificaciones presentó dos contribuciones simétricas centradas en 458.32 eV (Ti 2p_{3/2}) y 464.05 eV (Ti 2p_{1/2}). La separación energética observada concuerda con el desdoblamiento espín-órbita típico del Ti⁴⁺ en redes cristalinas de tipo anatasa/rutilo [14–17]. La ausencia de señales adicionales o asimetrías en los picos indica que el titanio se encuentra predominantemente en estado +4, lo que confirma una superficie estequiométrica sin defectos electrónicos detectables con esta técnica.

En el caso del sistema 1%Co/TiO₂, el perfil espectral de Ti 2p mostró un leve desplazamiento hacia energías de enlace ligeramente superiores (458.57 eV y 464.57 eV), acompañado de un ensanchamiento y asimetría de las señales. La deconvolución permitió distinguir cuatro contribuciones: dos asociadas a Ti⁴⁺ y dos adicionales atribuidas a Ti³⁺ superficial (459.75 eV y 465.37 eV)[18]. El análisis cuantitativo indicó una proporción aproximada de 67% Ti⁴⁺ y 33 % Ti³⁺.

La aparición de Ti³⁺ sugiere la generación de vacancias de oxígeno inducidas por la interacción con las especies de cobalto. Estos defectos estructurales son particularmente relevantes en sistemas fotocatalíticos, ya que actúan como centros de captura de electrones y favorecen tanto la adsorción de CO₂ como la transferencia interfacial de carga, procesos determinantes para la formación selectiva de isopropanol.

El espectro de Co 2p del material modificado evidenció las señales características del desdoblamiento espín-órbita en 780.68 eV (Co 2p_{3/2}) y 796.48 eV (Co 2p_{1/2}), con una separación aproximada de 15.8 eV.

La deconvolución del componente Co 2p_{3/2} reveló contribuciones atribuibles a Co²⁺ (782.37 eV) y Co³⁺ (780.04 eV)[19–22], mientras que las señales correspondientes en la región 2p_{1/2} confirmaron la coexistencia de ambos estados de oxidación. La presencia de picos satélite intensos respalda la asignación de especies de cobalto en un entorno oxidado, lo cual es consistente con la fase espinela Co₃O₄ y con interacciones electrónicas Co-O bien definidas. **Figura 2.**

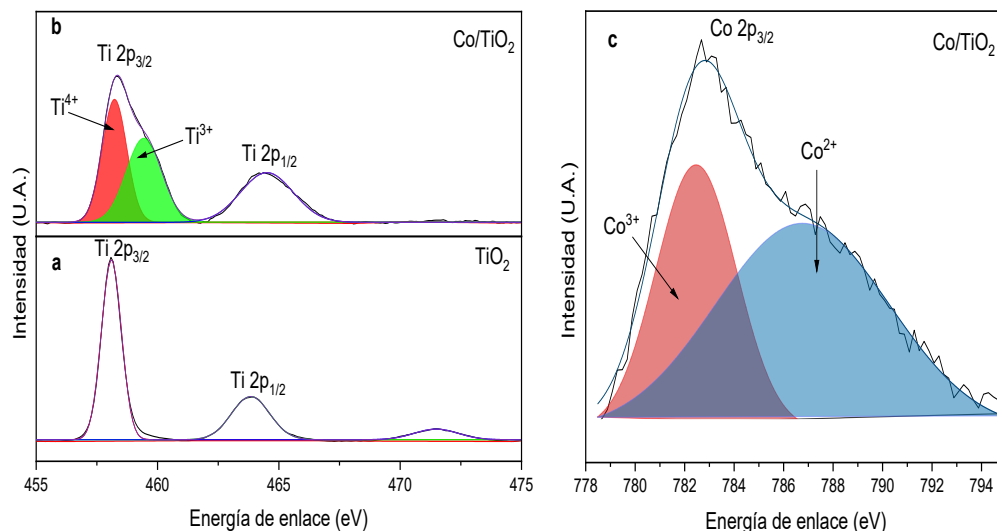


Figura 2. Espectro XPS de alta resolución de a) Ti 2p, b) Ti 2p en 1%Co/TiO₂ y c) Co 2p en 1% Co/TiO₂.

El análisis cuantitativo de áreas indicó una mayor proporción superficial de Co²⁺ (71%) respecto a Co³⁺ (29%), lo que sugiere una superficie enriquecida en centros redox potencialmente activos. Esta coexistencia de Co²⁺/Co³⁺ favorece procesos de transferencia electrónica cíclica, lo que facilita la activación de CO₂ y la generación de especies reactivas implicadas en la formación de isopropanol.

Adicionalmente, la relación superficial Co/Ti determinada por XPS evidenció que aproximadamente el 27% de los átomos de titanio superficiales están cubiertos por o interactúan con especies de cobalto. Este grado de cobertura indica una dispersión adecuada del componente activo, preservando simultáneamente los sitios del soporte necesarios para los procesos de separación de carga y de adsorción reactiva. En conjunto, el análisis XPS confirma que la incorporación de Co modifica significativamente la estructura electrónica superficial del TiO₂, lo que promueve la generación de defectos y centros redox que favorecen la eficiencia y la selectividad en la producción fotocatalítica de isopropanol.

Reducción fotocatalítica de CO₂. Con el objetivo de analizar la influencia de la energía de irradiación sobre la fotorreducción de CO₂, se evaluaron los fotocatalizadores de TiO₂ y 1%Co/TiO₂ empleando dos fuentes fotónicas diferentes, UV (254 nm) y visible. Después de 1 hora

de irradiación, se tomaron muestras gaseosas mediante el burbujeo de CO_2 a través de la fase líquida del sistema de reacción. Estas muestras contienen tanto especies volátiles arrastradas por el flujo de CO_2 como productos parcialmente disueltos en el medio líquido. El análisis cualitativo y cuantitativo se realizó mediante espectroscopía FTIR. El análisis por FTIR se acopló con curvas de calibración previas usando estándares certificados en fases gaseosas y en líquidos evaporados (Bruker Vertex 70 con celda de gases de paso largo), lo que permitió la deconvolución precisa mediante segundas derivadas matemáticas en el software Grams/AI 7.02 para evitar el solapamiento de bandas de estiramiento C-O y C=O entre el isopropanol, el acetaldehído y el ácido fórmico. Como control, se realizó una prueba en blanco en ausencia de fotocatalizador, bajo las mismas condiciones experimentales, sin detectarse formación de productos con ninguna de las fuentes de irradiación.

El análisis cuantitativo de las corrientes gaseosas obtenidas mostró que el producto mayoritario fue isopropanol con trazas de ácido fórmico, formaldehído, metanol y acetaldehído. La concentración máxima del producto mayoritario se muestra en la **Figura 3**.

En la figura se observa la formación de isopropanol bajo luz UV y visible. Los fotocatalizadores modificados con Co mostraron una actividad superior a la del TiO_2 prístino en la formación de isopropanol, lo que confirma el papel promotor del cobalto en la fotoactividad del TiO_2 . Este comportamiento sugiere que la hidrogenación del CO_2 ocurre a una velocidad mayor que la de su desoxigenación, lo que favorece la formación de compuestos oxigenados. Asimismo, se ha reportado que la fotorreducción de CO_2 en sistemas acuosos sigue complejas redes de reacción debido a la multiplicidad de rutas electrónicas disponibles entre los portadores fotogenerados y las especies adsorbidas.

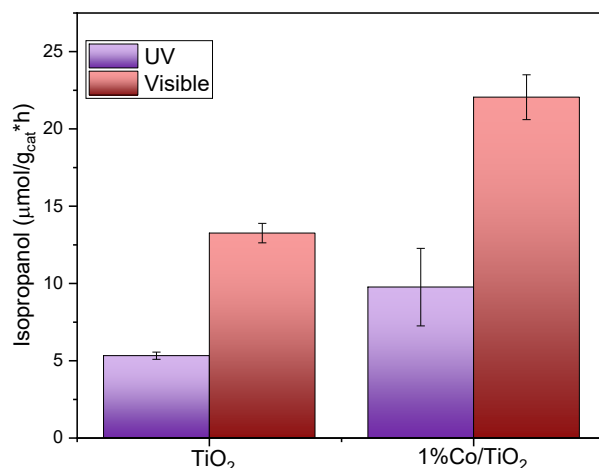


Figura 3. Producción de isopropanol sobre TiO_2 y 1%Co/ TiO_2 bajo irradiación UV y visible

Los espectros UV-Vis de los fotocatalizadores CoTiO_2 muestran una banda de absorción intensa y amplia entre 400 y 800 nm, asociada a especies activas de Co^{2+} y Co^{3+} en la región visible. La mejora en la actividad fotocatalítica del TiO_2 tras la incorporación de Co se atribuye principalmente a la prolongación de la vida útil de los electrones excitados en la banda de conducción; es decir, el cobalto actúa como una trampa de electrones, lo que reduce la recombinación electrón-hueco y

favorece las reacciones de reducción [23], por lo que se observa una mayor producción de isopropanol bajo irradiación visible. Los datos demuestran que el TiO₂ prístino presenta una actividad significativamente inferior a la de los materiales modificados con cobalto.

Este comportamiento es consistente con reportes previos que demuestran que la deposición de metales de transición sobre TiO₂ mejora la producción fotocatalítica de alcoholes bajo luz visible. En particular, se ha informado de que una carga cercana al 1% en peso de Co sobre TiO₂ conduce a rendimientos óptimos de alcoholes ligeros [24]. Por otra parte, el TiO₂ prístino mostró una mayor actividad fotocatalítica bajo radiación visible. Este fenómeno se atribuye a las propiedades ópticas intrínsecas derivadas de su síntesis. El análisis UV-Vis reveló que TiO₂ presenta una banda prohibida de 2.97 eV, lo que equivale a una longitud de onda de 417 nm y se ubica en el intervalo del espectro visible. La aplicación de una radiación energética superior a este umbral —como la del espectro ultravioleta— induce un exceso de energía libre que acelera la recombinación de los portadores de carga fotogenerados (e⁻/h⁺) antes de que puedan migrar a la superficie. Por lo tanto, al operar en la radiación visible, el sistema reduce la velocidad de recombinación, lo que justifica el incremento observado en la actividad fotocatalítica bajo esta fuente de iluminación.

La **Tabla 2** muestra el balance electrónico bajo radiación UV y visible, y la selectividad hacia isopropanol para ambos catalizadores, calculados mediante la Ecuación 2.

$$\%S = \frac{18 e^{-} \times n_{isopropanol}}{\sum (e^{-} \times n_{productos})} \quad (2)$$

Tabla 2. Flujo de electrones y selectividad hacia isopropanol bajo diferentes fuentes de radiación

Radiación	Fotocatalizador	Flujo de e ⁻ (μmol)	Selectividad (%)
UV	TiO ₂	95.98	99.77
	1%Co/TiO ₂	176.70	99.42
Visible	TiO ₂	240.12	90.40
	1%Co/TiO ₂	401.92	98.75

En la tabla se observa que el TiO₂ prístino y el fotocatalizador de 1%Co/TiO₂ exhibieron una alta selectividad hacia el isopropanol, alcanzando valores de 99.77% y 99.42%, respectivamente. En ambos fotocatalizadores, los subproductos simples (C1, ácido fórmico, formaldehído, metanol) permanecieron fijos en límites de detección analíticas (0.01 μmol). La diferencia medular introducida por la incorporación del cobalto no radica en la alteración de la ruta selectiva bajo luz UV, sino en una aceleración drástica de la cinética de transferencia de carga. El flujo total de electrones útiles invertidos en el proceso de fotorreducción aumentó en un 84.10%, pasando de 95.98 μmol de e⁻ en el blanco de titania a 176.70 μmol de e⁻ en el catalizador dopado. Este fenómeno demuestra que la introducción superficial de especies de cobalto actúa como un sumidero cinético eficiente que mitiga la recombinación de los portadores de carga fotogenerados en la banda de conducción del TiO₂.

Bajo radiación visible, el TiO₂ prístino procesa un total de 240.12 μmol de e^- , mientras que el fotocatalizador 1%Co/TiO₂ alcanza un máximo de 401.92 μmol de e^- , lo que representa un incremento del 67.38%. Este aumento se correlaciona directamente con las transiciones subbandgap identificadas por DRS y XPS, en las que la coexistencia de los estados de oxidación Co²⁺ y Co³⁺ genera niveles de energía discretos (estados intrabanda) dentro de la brecha de banda prohibida del semiconductor, lo que permite la absorción y la explotación eficientes de fotones en la región visible.

A pesar de la alta generación de portadores de carga bajo luz visible, la selectividad electrónica hacia el isopropanol se mantuvo constante. Es importante mencionar que la concentración de acetaldehído (CH₃CHO) aumentó de 0.12 μmol en el TiO₂ a 0.49 μmol en el sistema dopado (**Tabla 3-4**). En términos de balance energético, esto representó un redireccionamiento controlado de 4.9 μmol de e^- hacia la ruta del intermediario C2. Desde una perspectiva mecanicista, la acumulación detectable de acetaldehído actúa como la huella digital molecular que valida el mecanismo de acoplamiento C-C consecutivo.

Tabla 3. Productos detectados por FTIR durante la fotoreducción de CO₂ bajo radiación UV

Productos ($\mu\text{mol} \cdot \text{gcat}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	Fotocatalizadores	
	TiO ₂	1%Co/TiO ₂
Ácido fórmico	0.01	0.01
Acetaldehído	0.01	0.01
Formaldehído	0.01	0.01
Metanol	0.01	0.09
Isopropanol	5.32	9.76

Tabla 4. Productos detectados por FTIR durante la fotoreducción de CO₂ bajo radiación visible

Productos ($\mu\text{mol} \cdot \text{gcat}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	Fotocatalizadores	
	TiO ₂	1%Co/TiO ₂
Ácido fórmico	0.01	0.01
Acetaldehído	0.12	0.49
Formaldehído	0.01	0.01
Metanol	0.03	0.01
Isopropanol	13.26	22.05

El factor de amplificación cinético interfacial (FACI) es la relación de electrones procesados por unidad de energía de banda gap disponible (Ecuación 3):

$$FACI = \frac{\text{Flujo de electrones}}{E_g} \quad (3)$$

El análisis cinético-fotónico (**Tabla 5**) revela el efecto sinérgico en el sistema 1%Co/TiO₂, demostrando que el catalizador modificado duplica el solapamiento electrónico (intersección espacial de las nubes electrónicas (orbitales atómicos) de dos o más átomos cuando se aproximan lo suficiente para formar un enlace de tipo covalente) respecto a la titania, alcanzando un valor crítico de 147.76 $\mu\text{mol } e^- \cdot \text{eV}^{-1}$ bajo radiación visible, lo que descarta que las especies de cobalto

actúan como filtros ópticos pasivos (absorbe luz pero no participa en el proceso de reacción). Mientras que en el TiO_2 la energía libre de los fotones absorbidos se disipa mediante recombinación no productiva hacia productos monocarbonados (C1). La coexistencia interfacial del sitio activo trimálico ($\text{Ti}^{3+}\text{-O}_{\text{vac}}\text{-Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$), determinada mediante XPS, actúa como un rectificador cuántico de carga. Los estados intrabanda generados no solo estrechan el band gap de 2.97 eV a 2.72 eV, sino que también prolongan la vida media superficial de los electrones fotogenerados; esto eleva la probabilidad de colisión y de adsorción del CO_2 y del intermediario detectado, C2 (acetaldehído). Este aumento energético permitió sostener la demanda multielectrónica de $18e^-$ con selectividad hacia el isopropanol.

Tabla 5. Factor de amplificación cinético interfacial

Radiación	Fotocatalizador	FACI ($\mu\text{mol } e^- \cdot \text{eV}^{-1}$)
UV	TiO_2	95.98
	1%Co/ TiO_2	176.70
Visible	TiO_2	240.12
	1%Co/ TiO_2	401.92

Consideraciones mecanísticas. Con base en la distribución de productos detectados durante la reducción fotocatalítica de CO_2 con H_2O sobre TiO_2 y 1%Co/ TiO_2 reportados en las tablas 3 y 4 y los resultados obtenidos en XPS se propone el siguiente mecanismo de reacción:

1. Transferencia de CO_2 y H_2O a la superficie de los fotocatalizadores Co/ TiO_2 .
2. Adsorción de CO_2 y H_2O sobre la superficie del fotocatalizador. La adsorción del CO_2 se produce mediante la interacción entre los orbitales de Ti^{4+} , Co^{2+} y Co^{3+} y los orbitales π^* del CO_2 . Esta interacción debilita el enlace $\text{C}=\text{O}$, lo que favorece la flexión de la molécula y su capacidad de aceptar electrones. La adsorción de H_2O se produce mediante la interacción con los sitios activos de TiO_2 y con especies de Co^{3+} .
3. Fotoabsorción por los fotocatalizadores Co/ TiO_2 y generación de pares electrón-hueco (e^-/h^+) en TiO_2 y en las especies de Co.
4. El h^+ fotogenerado oxida el H_2O adsorbido, produciendo protones (H^+) y radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$).
5. El radical $\text{CO}_2\bullet^-$ se forma mediante la reducción del CO_2 adsorbido con los electrones fotogenerados.
6. Los H^+ , e^- y radicales intermedios reaccionan a través de rutas sucesivas de hidrogenación para formar productos tales como: metanol (CH_3OH), acetaldehído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$), hasta llegar a isopropanol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$).
7. Desorción de los productos finales desde la superficie del fotocatalizador.
8. Transferencia de los productos desde la superficie del fotocatalizador al medio de reacción.

Con base en la literatura y en los productos detectados mediante espectroscopía FTIR, se propone el siguiente paso de la reacción. **Figura 7.**

Paso 1. Formación de ácido fórmico (CHOOH) y formaldehído.

Paso 2. Formación de metanol.

Paso 3. Formación del acetaldehído.

Paso 4. Formación de isopropanol.

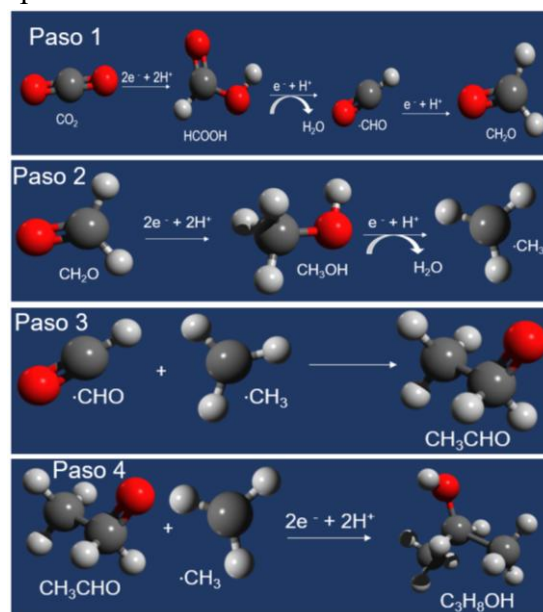


Figura 7. Mecanismo de reacción propuesto para la formación de isopropanol

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que la modificación de TiO₂ con 1% de Co induce un efecto sinérgico entre Ti³⁺, Co²⁺ y Co³⁺ que reduce la banda prohibida y mejora la separación de los pares e⁻-h⁺, lo que favorece la activación del CO₂ y la formación de intermediarios clave para el acoplamiento C-C. El fotocatalizador 1%Co/TiO₂ presentó mayor actividad, mayor selectividad hacia el isopropanol y mayor estabilidad frente al TiO₂ prístino.

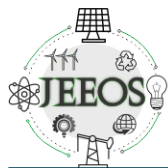
Asimismo, se identificó que el flujo fotónico en el rango visible es óptimo para maximizar la producción. En conjunto, el control de los estados redox del cobalto y de los defectos en TiO₂ se confirma como una estrategia efectiva para dirigir la fotoreducción de CO₂ hacia alcoholes C₃ de mayor valor energético.

REFERENCIAS

- [1] Abdullah H, Khan MdMR, Ong HR, Yaakob Z (2017) Modified TiO₂ photocatalyst for CO₂ photocatalytic reduction: An overview. Journal of CO₂ Utilization 22:15–32.
- [2] Akshay VR, Arun B, Dash S, et al (2018) Defect mediated mechanism in undoped, Cu and Zn-doped TiO₂ nanocrystals for tailoring the band gap and magnetic properties. RSC Adv 8:41994–42008.

- [3] Alex C, Sarma SCh, Peter SC, John NS (2020) Competing Effect of Co³⁺ Reducibility and Oxygen-Deficient Defects Toward High Oxygen Evolution Activity in Co₃O₄ Systems in Alkaline Medium. *ACS Appl Energy Mater* 3:5439–5447.
- [4] Bharti B, Kumar S, Lee H-N, Kumar R (2016) Formation of oxygen vacancies and Ti³⁺ state in TiO₂ thin film and enhanced optical properties by air plasma treatment. *Sci Rep* 6:32355.
- [5] Chen Q, Ji F, Liu T, et al (2013) Synergistic effect of bifunctional Co–TiO₂ catalyst on degradation of Rhodamine B: Fenton-photo hybrid process. *Chemical Engineering Journal* 229:57–65.
- [6] Feng H, Zhang J, Wang X, Lee TH (2018) Analysis of auto-ignition characteristics of low-alcohol/iso-octane blends using combined chemical kinetics mechanisms. *Fuel* 234:836–849.
- [7] Ghadikolaie MA, Wong PK, Cheung CS, et al (2021) Impact of lower and higher alcohols on the physicochemical properties of particulate matter from diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 143:110970.
- [8] Hamadani M, Reisi-Vanani A, Majedi A (2010) Sol-gel preparation and characterization of Co/TiO₂ nanoparticles: Application to the degradation of methyl orange. *JICS* 7: S52–S58.
- [9] Jin C, Liu B, Lei Z, Sun J (2015) Structure and photoluminescence of the TiO₂ films grown by atomic layer deposition using tetrakis-dimethylamino titanium and ozone. *Nanoscale Res Lett* 10:95.
- [10] Khalilzadeh A, Shariati A (2018) Photoreduction of CO₂ over heterogeneous modified TiO₂ nanoparticles under visible light irradiation: Synthesis, process and kinetic study. *Solar Energy* 164:251–261.
- [11] Khan MdM, Sharma RP, Kadian AK, Hasnain SMM (2022) An assessment of alcohol inclusion in various combinations of biodiesel-diesel on the performance and exhaust emission of modern-day compression ignition engines – A review. *Materials Science for Energy Technologies* 5:81–98.
- [12] Kumar Singh A, Das C, Indra A (2022) Scope and prospect of transition metal-based cocatalysts for visible light-driven photocatalytic hydrogen evolution with graphitic carbon nitride. *Coordination Chemistry Reviews* 465:214516.
- [13] Li J, Li Z, Ning F, et al (2018) Ultrathin Mesoporous Co₃O₄ Nanosheet Arrays for High-Performance Lithium-Ion Batteries. *ACS Omega* 3:1675–1683.
- [14] Liu J, Ma X, Yang L, et al (2018) In situ green oxidation synthesis of Ti³⁺ and N self-doped SrTiO_xN_y nanoparticles with enhanced photocatalytic activity under visible light. *RSC Adv* 8:7142–7151.

- [15] Mardones C, Baeza N (2018) Economic and environmental effects of a CO₂ tax in Latin American countries. *Energy Policy* 114:262–273.
- [16] McGee M (2022) Global CO₂ emissions. In: CO₂.earth. <https://www.co2.earth/global-co2-emissions>. Accessed 6 Oct 2022.
- [17] Ola O, Maroto-Valer MM (2015) Transition metal oxide based TiO₂ nanoparticles for visible light induced CO₂ photoreduction. *Applied Catalysis A: General* 502:114–121.
- [18] Valadkhani A, Smyth R, Nguyen J (2019) Effects of primary energy consumption on CO₂ emissions under optimal thresholds: Evidence from sixty countries over the last half century. *Energy Economics* 80:680–690.
- [19] Wang L, Qi T, Wang J, et al (2018) Uniform dispersion of cobalt nanoparticles over nonporous TiO₂ with low activation energy for magnesium sulfate recovery in a novel magnesia-based desulfurization process. *Journal of Hazardous Materials* 342:579–588.
- [20] Wang W, Li T, Komarneni S, et al (2022) Recent advances in Co-based co-catalysts for efficient photocatalytic hydrogen generation. *Journal of Colloid and Interface Science* 608:1553–1575.
- [21] Xu L, Jiang Q, Xiao Z, et al (2016) Plasma-Engraved Co₃O₄ Nanosheets with Oxygen Vacancies and High Surface Area for the Oxygen Evolution Reaction. *Angew Chem Int Ed* 55:5277–5281.
- [22] Zhang L, Jaroniec M (2018) Toward designing semiconductor-semiconductor heterojunctions for photocatalytic applications. *Applied Surface Science* 430:2–17.
- [23] Zhao Y, Wei Y, Wu X, et al (2018) Graphene-wrapped Pt/TiO₂ photocatalysts with enhanced photogenerated charges separation and reactant adsorption for high selective photoreduction of CO₂ to CH₄. *Applied Catalysis B: Environmental* 226:360–372.
- [24] Zheng L, Li H, Xu X (2018) Catalytic decomposition of N₂O over Mg-Co composite oxides hydrothermally prepared by using carbon sphere as template. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* 46:569–577.



Predicción de la potencia en una turbina vestas v52 mediante regresión polinomial y una red neuronal

Power prediction for vestas v52 wind turbine using polynomial regression and neural networks

Olan-Barroso A.A.^{1*}, Alaffita-Hernández F.A.², Escobedo-Trujillo B.A.¹, Colorado-Garrido D.²

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Av. Universidad Veracruzana Km. 7.5, Col. Santa Isabel I, Coatzacoalcos, 96538, Veracruz, México

² Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables (CIRES), Universidad Veracruzana, Av. Universidad Veracruzana Km. 7.5, Col. Santa Isabel I, Coatzacoalcos, 96538, Veracruz, México

*zS22017148@estudiantes.uv.mx

falaffita@uv.mx

Artículo Científico

Publicado: 31 de agosto 2026

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un modelo polinomial y una red neuronal para predecir la potencia eléctrica del aerogenerador Vestas V52 ubicado en el campus del Instituto de Tecnología de Dundalk (DkIT), Irlanda. Se utilizaron datos experimentales del aerogenerador, correspondientes a registros promedio de cada diez minutos adquiridos entre enero de 2006 y marzo de 2020. Las variables de entrada incluyeron principalmente parámetros operativos relevantes de la turbina y factores ambientales disponibles en los datos SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Los modelos fueron implementados, entrenados y validados en MATLAB empleando los datos registrados. El desempeño de los modelos fue evaluado mediante métricas estadísticas como el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (RMSE). Los resultados mostraron que ambos enfoques permiten estimar la potencia generada con un nivel adecuado de precisión. La red neuronal artificial con función de activación ReLU obtuvo un coeficiente de determinación de 0.9845 y un RMSE de 26.78 kW. No obstante, el modelo de regresión polinomial destaca por su practicidad operativa, facilitando el cálculo de la potencia sin un alto costo computacional. Ambos modelos se establecen como herramientas eficaces para el análisis del rendimiento energético de aerogeneradores Vestas V52 sometidos a condiciones normales de funcionamiento.

Palabras clave: Regresión polinomial, Redes neuronales, Energía eólica.

ABSTRACT

This study presents the development of a polynomial model and an artificial neural network to predict the electrical power output of a Vestas V52 wind turbine located at the Dundalk Institute of Technology (DkIT), Ireland. Experimental data consisting of ten-minute average records

collected between January 2006 and March 2020 were used to develop the models. The input variables included key operational parameters of the wind turbine together with environmental variables available from the SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system. Both models were implemented, trained, and validated in MATLAB. Their performance was assessed using the coefficient of determination (R^2) and the root mean square error (RMSE). The results demonstrate that both approaches provide accurate estimates of the generated electrical power. The artificial neural network with the ReLU activation function achieved an R^2 of 0.9845 and an RMSE of 26.78 kW. Meanwhile, the polynomial regression model offers a practical alternative by enabling rapid power estimation with low computational cost. Overall, both models constitute effective tools for evaluating the energy performance of Vestas V52 wind turbines operating under normal conditions.

Keywords: Neural networks, Polynomial regression, Wind energy.

INTRODUCCION

La creciente integración de la energía eólica en los sistemas eléctricos modernos ha incrementado la necesidad de contar con métodos confiables para la predicción de la potencia eléctrica de aerogeneradores. Una estimación precisa de la potencia eólica resulta fundamental para la evaluación del rendimiento energético, la optimización de la operación y la planeación de sistemas eléctricos provenientes de fuentes renovables [1].

La potencia generada por una turbina eólica depende de múltiples factores ambientales y operativos que varían continuamente durante su funcionamiento. Las curvas de potencia nominales y los modelos teóricos tradicionales no siempre representan adecuadamente el comportamiento real de los aerogeneradores bajo condiciones operativas, lo que limita su precisión para el análisis del desempeño energético [2].

No obstante, en estudios recientes se han desarrollado distintos modelos con el fin de incrementar la precisión en la predicción de la potencia en el campo de la energía eólica. Por ejemplo, Pelletier-F., Masson-C. y Tahan-A. [3] realizaron múltiples entrenamientos utilizando algoritmos de inteligencia artificial para modelar la curva de potencia de un aerogenerador. Asimismo, Kim- Y. S. [4] analizó diferentes métodos de normalización (normalización de min-max, normalización de Z-score, entre otros) aplicados a distintos tipos de redes neuronales con el propósito de mejorar su desempeño. El enfoque híbrido propuesto por Escobedo-Trujillo- B. A. [5], combina redes neuronales artificiales y un modelo polinomial, metodología similar a la desarrollada en el presente trabajo. Asimismo, Gijón-R., A. [6] presenta una comparación entre tres enfoques de modelado: basado en la física, basado en datos y modelos híbridos. En conjunto, estos trabajos muestran que tanto las técnicas de inteligencia artificial como los modelos híbridos han permitido mejorar la precisión en la predicción de la potencia eólica, aunque presentan distintos niveles de complejidad computacional y metodológica.

No obstante, la literatura revisada se ha enfocado principalmente en modelos de redes neuronales para la predicción de potencia utilizando datos experimentales de aerogeneradores, obteniendo resultados con alta capacidad predictiva. Sin embargo, son escasos los estudios que comparan directamente el desempeño de estos modelos en contra de expresiones matemáticas más simples, como los modelos polinomiales. En este contexto, el presente trabajo propone un modelo polinomial para la predicción de la potencia eléctrica de un aerogenerador y su comparación con una red neuronal artificial. A diferencia de un modelo complejo, el modelo polinomial permite predecir la potencia mediante la sustitución directa de las variables de entrada, sin requerir un proceso de entrenamiento ni un elevado costo computacional.

METODOLOGÍA

Descripción del aerogenerador y sitio de estudio. La turbina tipo Vestas V52 cuenta con una potencia nominal de 850.0 kW y está equipada con 3 álabes de rotor, cuya velocidad máxima es de 31.4 rpm, con conexión a una red asíncrona de 50 Hz. Sus dimensiones incluyen un diámetro de rotor de 52 m, un área de 2,124 m² y una altura de buje de 60 m. Los pesos de sus componentes son 11.0 toneladas para el rotor, 100 toneladas para la torre y 22 toneladas para la góndola, el aerogenerador cuenta con una protección anticorrosiva.

La turbina eólica se encuentra instalada en el campus del Instituto de Tecnología de Dundalk (DkIT), Irlanda, en las coordenadas geográficas 53.983° N y 6.392° O, a una elevación aproximada de 13 m sobre el nivel del mar. La ubicación del emplazamiento resulta favorable debido a las características del terreno circundante. Esta ubicación corresponde a un entorno periurbano con predominancia de tierras agrícolas en un radio de 20 km, lo que implica menor presencia de obstáculos que alteren el flujo del viento. No obstante, existe un edificio de 47 metros de altura que se encuentra aproximadamente a 335 m.

Sistema de adquisición de datos SCADA. Los parámetros de operación se obtuvieron por medio de un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Este sistema registra y almacena información en intervalos de diez minutos a través de un controlador conectado a un anemómetro ultrasónico 2-D Thies Clima instalado en la góndola, el cual mide la velocidad y dirección del viento para corregir la posición de la turbina.

Los datos del sistema de posición se registraron por medio de encoders y medidores de posición integrados en el control de la turbina VMP (Vestas Multiprocesador), que transmiten señales eléctricas al sistema SCADA para su almacenamiento e interpretación en secuencias temporales. Asimismo, el sistema registra datos asociados con la potencia eléctrica y temperatura, incluyendo: potencia promedio, potencia mínima, potencia máxima, potencia reactiva, temperatura ambiente, temperatura de la góndola, temperatura del aceite de la caja de engranajes, entre otros.

Descripción de la base de datos. Los datos experimentales fueron obtenidos por [7] y consisten en 653,103 datos registrados correspondientes al período que abarca del 30 de enero del 2006 al

12 de marzo de 2020, los datos se registraron mediante el cálculo de la media aritmética de las muestras para cada intervalo de 10 minutos.

Con el fin de facilitar el análisis, se descartó la variable de temperatura del generador al registrar un valor constante de 999 °C, lo que indicó una falla en el sensor. Asimismo, las variables de potencia máxima, potencia mínima y potencia reactiva no fueron consideradas para el desarrollo de los modelos, ya que el objetivo fue predecir la potencia eléctrica a partir de variables independientes. Debido a que estas variables están directamente relacionadas con la potencia generada, su inclusión como variables de entrada haría que el modelo utilizara información asociada al valor que se pretende estimar. No obstante, estas modificaciones se limitaron a la selección de las variables empleadas en el modelado. **Tabla 1.**

Tabla 1. Variables operativas utilizadas como entradas de los modelos.

Variable	Intervalos	Descripción
V1	[0, 368.4]	Velocidad del viento (m/s)
V2	[0, 183.2]	Desviación estándar de la velocidad del viento (m/s)
V3	[-3224.7, 3175]	Dirección absoluta del viento (°)
V4	[-2969.2, 2406.4]	Dirección relativa del viento (°)
V5	[-5.2, 86.6]	Paso de las palas (Pitch) (°)
V6	[0, 1622]	Velocidad angular del generador (rpm)
V7	[0, 26.2]	Velocidad angular del rotor (rpm)
V8	[-3, 27]	Temperatura ambiente (°C)
V9	[0, 34]	Temperatura de la góndola (°C)
V10	[0, 205]	Temperatura del aceite de la caja de engranajes (°C)
V11	[0, 205]	Temperatura del rodamiento de la caja de engranajes (°C)
V12	[0, 130]	Temperatura de la fase 1 del generador (°C)
V13	[0, 204]	Temperatura de la fase 2 del generador (°C)
V14	[0, 131]	Temperatura de la fase 3 del generador (°C)
V15	[-50, 205]	Temperatura del rodamiento del generador (°C)
V16	[-3274.9, 3149.1]	Potencia eléctrica promedio (kW)

Por otra parte, los datos experimentales presentan dos fuentes principales de valores atípicos. Por un lado, se llevó a cabo el reemplazo de la caja de engranes entre el 4 de octubre de 2018 y el 27 de julio de 2019, periodo en el que no se registraron valores positivos de potencia eléctrica. Por

otro lado, se identificaron errores de medición provenientes de los sensores del sistema SCADA, los cuales registraron magnitudes físicamente imposibles. Como consecuencia, los intervalos crudos presentados en la **Tabla 1** incluyen valores mínimos y máximos que no representan las condiciones reales de operación del aerogenerador, sino lecturas anómalas derivadas de fallas de medición. Cabe destacar que, para el análisis desarrollado en este artículo, no se eliminó ningún dato de la muestra original.

MODELOS DE PREDICCIÓN

Modelo de red neuronal artificial. Se desarrolló un modelo de red neuronal artificial empleando las variables independientes $V1, V2, \dots, V15$ y la potencia eléctrica promedio generada ($V16$) como variable dependiente (ver **Tabla 1**). La salida del modelo se expresa mediante la ecuación (1).

$$\hat{y} = W_2 f(W_1 X + b_1) + b_2 \quad (1)$$

En esta expresión, $\hat{y}$ representa la potencia eléctrica estimada, X corresponde al conjunto de variables independientes, W_1 y W_2 representan las matrices de pesos de la capa oculta y de salida, b_1 y b_2 corresponden a los términos de sesgo asociados a dichas capas mientras que $f(\cdot)$ denota la función de activación, la cual corresponde a la Unidad Lineal Rectificada (ReLU) debido a que reproduce de forma más adecuada el comportamiento físico del aerogenerador. En particular, la turbina no genera potencia eléctrica cuando la velocidad del viento es inferior a aproximadamente 3 m/s, condición conocida como velocidad de arranque. En consecuencia, el interés de este trabajo se centra en modelar el comportamiento del sistema únicamente bajo condiciones de generación. A diferencia de otras funciones de activación, que también aprenden el comportamiento del sistema fuera de esta región, ReLU anula los valores negativos y conserva únicamente la región positiva. Su expresión matemática se muestra en la ecuación (2).

$$\text{ReLU}(x) = \max(0, x) = \begin{cases} x & \text{if } x > 0, \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Esto resulta consistente con la curva de potencia del aerogenerador. Aunque otras funciones de activación presentaron valores ligeramente superiores de R^2 y menores valores de RMSE (ver **Tabla 2**), la selección de ReLU prioriza la coherencia física del modelo sobre una mejora marginal en las métricas de desempeño. El modelo cuenta con un esquema basado en una división temporal de los datos, compuesto por un 80% de los registros destinados a la fase de aprendizaje y un 20% para validación, debido a que el tamaño del registro de datos proporciona un conjunto de validación suficientemente representativo, permitiendo destinar una mayor cantidad de información al entrenamiento del modelo sin comprometer la evaluación de su capacidad de generalización [8].

Tabla 2. Valores de R^2 y RMSE obtenidos para las funciones de activación evaluadas.

Función de activación	R^2	RMSE
ReLU	0.9845	26.78 KW
Tanh	0.9897	21.795 KW
Sigmoid	0.9880	23.595 KW
LeakyRelu	0.9845	26.712 KW
Gelu	0.9848	26.511 KW

Como parte del entrenamiento se aplicó la normalización Z-score [4]. Esta ajusta cada variable para tener de media 0 y desviación estándar 1, con el objetivo de evitar una distorsión del conjunto de datos, esto asociado a los valores atípicos [9]. La fórmula característica se muestra en (3), donde z_i es el valor normalizado, x_i es la observación i -ésima, n es la cantidad de muestras, μ y σ son el promedio y la desviación estándar de las muestras.

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \text{ con } i = 1, \dots, n \quad (3)$$

A diferencia de la técnica de Levenberg-Marquardt [5], el entrenamiento se realizó mediante el optimizador ADAM fundamentado en su capacidad de gestionar tasas de aprendizaje adaptativas además de su robustez ante el ruido de los valores atípicos [10]. Para este proceso se estableció una tasa de aprendizaje (*learning rate*) inicial de 1×10^{-3} . Asimismo, se utilizó un lote de entrenamiento (*minibatch*) de 1024 muestras para actualizar los parámetros del modelo en cada iteración. El entrenamiento se realizó durante 150 épocas (*epochs*), donde cada época representa un recorrido completo por el conjunto de datos de entrenamiento, con el fin de asegurar la convergencia del modelo [11]. Dichos parámetros de configuración fueron seleccionados a partir de pruebas preliminares y basados en estudios anteriores [3].

Polinomio. La metodología adoptada se inspira en el enfoque de regresión polinomial usado por [12] para la predicción de eficiencia térmica, el cual se adapta en este estudio al análisis de la potencia eléctrica. En este contexto, se relaciona la variable dependiente P (potencia eléctrica) con un conjunto de variables operativas independientes $V1, V2, \dots, V15$, mostradas en la **Tabla 1**. El modelo general (4) se expresa como:

$$P = W(V1, V2, \dots, V15) + \varepsilon \quad (4)$$

donde W representa la función polinomial que describe el comportamiento de la potencia eléctrica en función de las variables independientes y ε corresponde a un error aleatorio. Se asume que ε es una variable aleatoria con distribución normal.

Para la construcción del modelo mostrado en la ecuación (4), se realizaron combinaciones empíricas entre las variables independientes, considerando términos lineales productos cruzados, términos cuadráticos y cúbicos con el objetivo de capturar interacciones no lineales presentes en el comportamiento del sistema, a partir de dichas combinaciones, se calculó el R^2 entre cada combinación de variables y la potencia predicha, seleccionando la combinación más simple que presentó mayor ajuste, para una explicación más detallada de la metodología, véase [13].

RESULTADOS

Polinomio. El modelo polinomial construido se muestra en la ecuación (5), ajustado con un coeficiente de determinación R^2 de 0.9688, esto indica que aproximadamente el 96.88% de la variabilidad de la potencia eléctrica del sistema es explicada por las variables operativas sin normalizar consideradas en la metodología.

$$\begin{aligned} P = & 13.65(V1) - 24.17(V1 \cdot V11) \quad (5) \\ & - 0.3283(V2) \\ & + 3.328(V3) \\ & - 0.02014(V4) \\ & - 0.008451(V5) \\ & - 0.2409(V6) \\ & - 0.2472(V7) \\ & + 7.491(V8) \\ & + 1.224(V9) \\ & - 2.376(V10) \\ & + 2.059(V11) \\ & - 1.325(V12) \\ & + 1.687(V13) \\ & + 0.7690(V14) \\ & - 0.4423(V15) \\ & - 0.9983(V12) \\ & + 0.1567(V13) \\ & - 0.0003882(V1 \cdot V5) \\ & + 0.3008(V1 \cdot V6) \\ & + 0.06519(V1 \cdot V2) \\ & - 0.06991 \end{aligned}$$

La alta correspondencia entre los valores de potencia real y los estimados por el modelo (5), mostrada en la **Figura 1**, evidencia que la mayoría de las predicciones se agrupa sobre la función identidad. Las principales dispersiones respecto a dicha función se atribuyen a la presencia de valores atípicos en la base de datos, originados principalmente durante el reemplazo de la caja de

engranajes del aerogenerador. Este proceso tuvo una duración aproximada de diez meses, periodo en el cual no se registraron condiciones normales de operación, por lo que las mediciones de potencia no representan el comportamiento habitual de la turbina. Asimismo, se observa una acumulación de datos alrededor de la potencia nominal de 850 kW, comportamiento asociado a la estrategia de control del aerogenerador, mediante la cual la potencia generada se limita al alcanzarse dicho valor nominal.

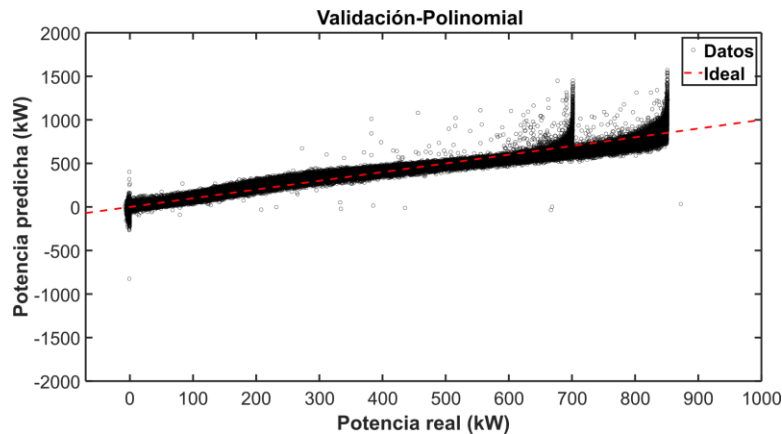


Figura 1. Potencia real contra la potencia predicha por regresión polinomial.

Análisis de residuos. Este permite determinar la variabilidad de ε , con la finalidad de evaluar la calidad del modelo (5), se crea el supuesto de que ε cuenta con una distribución normal con media cero y varianza constante, de modo que se puede aplicar el valor esperado (E) a ambos lados de la ecuación (4), siguiendo la metodología de [13].

$$E(P) = E(W(V1, V2, \dots, V15) + \varepsilon)$$

$$E(P) = E(W(V1, V2, \dots, V15)) + E(\varepsilon)$$

$$E(\varepsilon) = 0$$

$$E(P) = E(W(V1, V2, \dots, V15))$$

Se comprueba el supuesto de normalidad propuesto en el análisis de los residuos, se muestra en la **Figura 2** el histograma de los residuos estandarizados, el cual presenta una forma acampanada con media de aproximadamente cero.

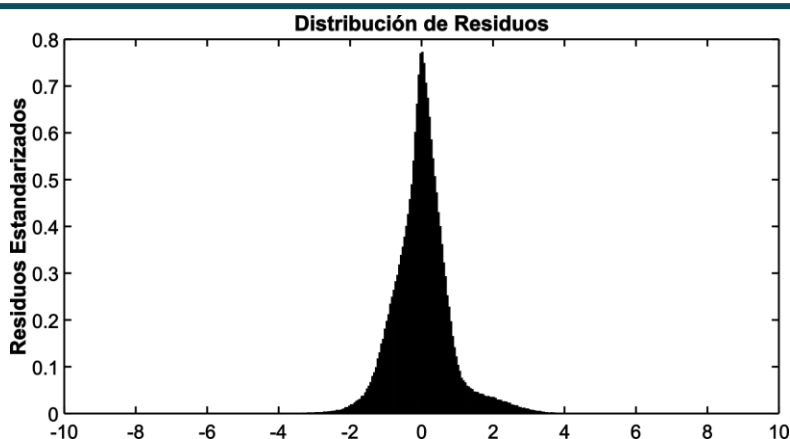


Figura 2. Histograma de los residuos estandarizados.

Debido a la distribución normal de los residuos, se aplicó la regla de las tres sigmas, al cual para una distribución normal cerca del 99.7 % de los valores de una muestra se encuentran dentro del intervalo $\mu \pm 3\sigma$ [14]. Puesto que los residuos presentan una media (μ) de aproximadamente cero, se simplifica a $\pm 3\sigma$, en la **Figura 3** se graficaron dos líneas horizontales en este intervalo, de modo que las observaciones fuera de este intervalo se consideraron valores atípicos, obteniéndose un total de 5434 valores atípicos.

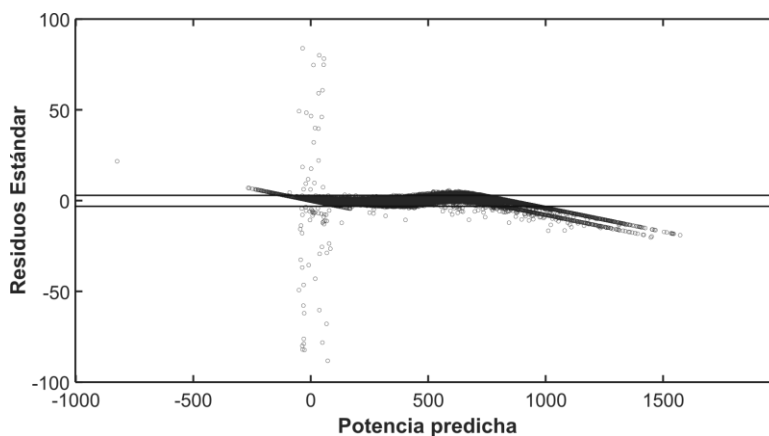


Figura 3. Residuos estandarizados contra valores predichos.

Adicionalmente, se confirma que los residuos son independientes al cumplir con los tres supuestos, donde la gráfica de la **Figura 4** muestra que los residuos cuentan con varianza constante (en forma de banda gris) y un promedio de aproximadamente cero. Los intervalos de confianza y los residuos están representados por las líneas grises y los puntos, respectivamente. Asimismo, los puntos rojos situados fuera de los intervalos de confianza corresponden a los valores atípicos previamente identificados.

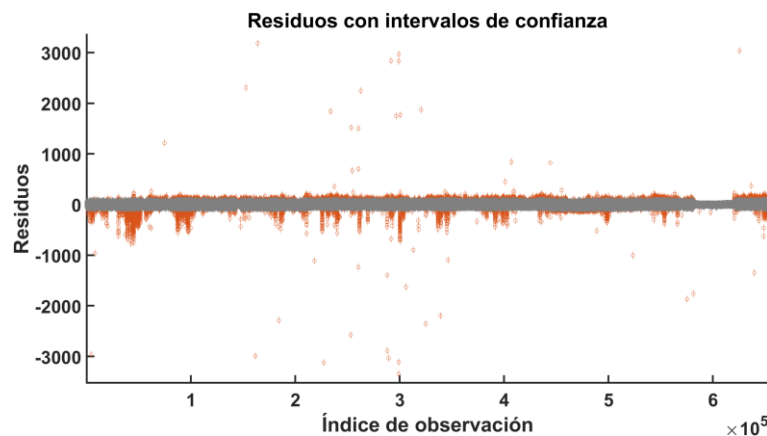


Figura 4. Dispersión de residuos con bandas de confianza.

Finalmente, con el propósito de evaluar la influencia de los valores atípicos sobre el ajuste del modelo (5), estos fueron depurados de la base de datos y la regresión fue recalculada. Se obtuvo un coeficiente de determinación de R^2 de 0.9830, lo que representa un incremento de 0.0142 respecto al obtenido con la base de datos original. Este resultado confirma que una parte importante de la disminución en el ajuste del modelo se encuentra asociada a la presencia de valores atípicos representado en la **Figura 5** donde se muestra la potencia real vs. la predicha apreciándose una menor dispersión de los datos y una mayor adherencia de las predicciones a la función identidad.

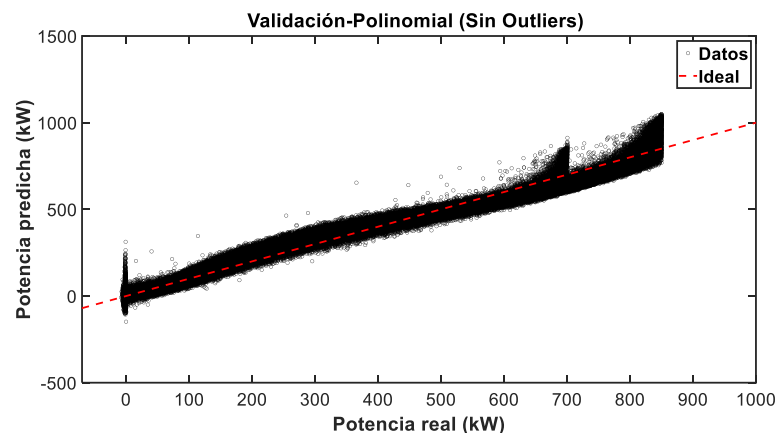


Figura 5. Potencia predicha vs potencia real sin valores atípicos.

Asimismo, para verificar si los errores se distribuyeron normalmente tras la depuración de la base de datos, se obtuvo el histograma de los residuos estandarizados mostrado en la **Figura 6**. Este presenta una forma acampanada más definida, con una media próxima a cero y una mayor concentración de los datos en torno a este valor, lo que indica que, aun después de la depuración de los valores atípicos, los residuos continúan aproximándose a una distribución normal con media aproximadamente igual a cero.

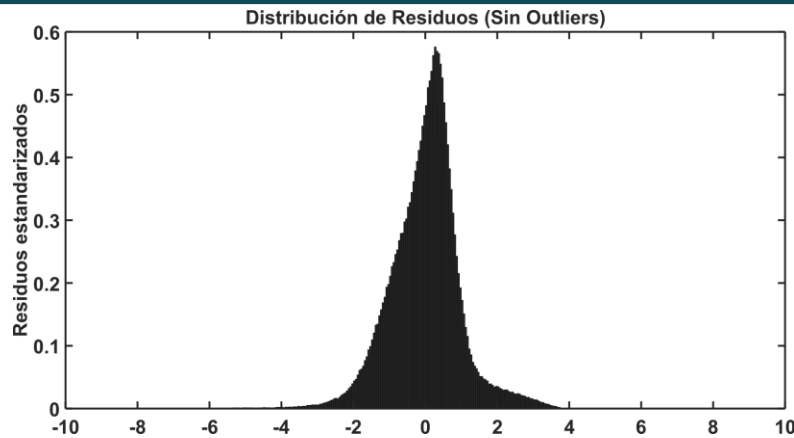


Figura 6. Histograma sin valores atípicos.

Red neuronal. Se obtuvo un valor de $R^2 = 0.9845$, lo que indica que el 98.45% de la variabilidad de la potencia eléctrica registrada es explicada por el modelo de red neuronal. Asimismo, se calculó un RMSE de 24 kW, evidenciando un menor error global de estimación en comparación con el modelo (5).

Los pesos y los valores de sesgo (*bias*) obtenidos tras el proceso de entrenamiento definen la configuración interna del modelo. La **Tabla 3** presenta los pesos que conectan las variables de entrada $V_1, V_2, \dots, V_{15}$ con las neuronas de la capa oculta $N_1, N_2, \dots, N_4$, junto con el valor de sesgo asociado a cada neurona. La **Tabla 4** muestra los pesos que conectan las neuronas de la capa oculta con la neurona de salida, además del correspondiente valor de sesgo de la capa de salida.

Como resultado de esta configuración, la **Figura 7** muestra la comparación de la potencia real vs. predicha mediante modelo de red neuronal, los puntos de datos muestran menor dispersión respecto a la función identidad representada en la línea roja, debido a un mayor ajuste del modelo de ANN.

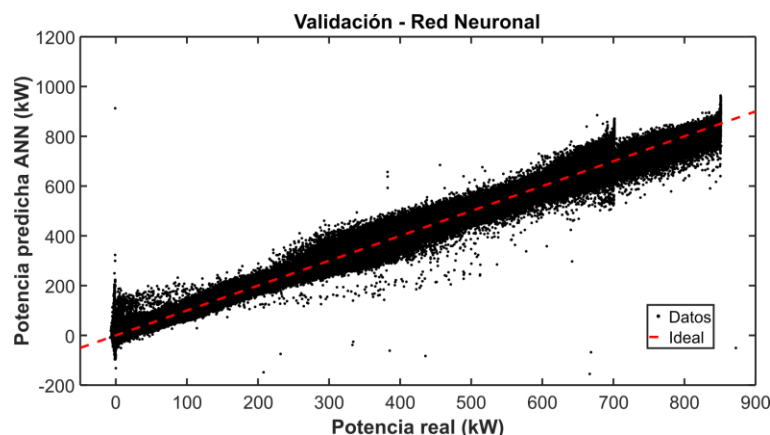


Figura 7. Potencia real vs. potencia predicha por ANN.

Tabla 3. Pesos y sesgos (bias) de la capa oculta.

	N_1	N_2	N_3	N_4
V1	0.072	0.136	-0.767	0.257
V2	0.008	-0.01	0.002	-0.132
V3	0.024	0.006	0.028	-0.018
V4	0.015	0.052	-0.009	0.007
V5	-1.051	0.793	-1.052	-0.04
V6	0.372	0.962	0.293	-0.473
V7	0.372	0.862	0.299	-0.597
V8	0.026	0.102	0.061	-0.086
V9	-0.077	-0.152	-0.081	0.126
V10	-0.04	0.026	-0.134	0.053
V11	-0.058	0.125	0.14	-0.038
V12	0.04	0.054	0.14	-0.208
V13	0.029	0.101	0.027	-0.064
V14	0.016	0.057	-0.039	0.027
V15	0.0001	-0.056	-0.056	0.081
Sesgo	-0.162	-1.58	0.26	1.274

Tabla 4. Pesos y sesgo de la capa de salida.

N_1	N_2	N_3	N_4	Sesgo
0.826	1.020	-1.068	-0.385	0.671

Ajuste de los modelos. Se presentan los resultados comparativos del ajuste de los modelos evaluados mediante el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Ambas métricas fueron utilizadas como criterios de evaluación para cuantificar la capacidad de ajuste y el error asociado a las predicciones generadas por cada modelo (ver **Tabla 5**). No obstante, el modelo de red neuronal es más complejo de replicar, pero presenta mayor robustez, mientras que el modelo polinomial destaca por su facilidad de implementación práctica.

Tabla 5. Métricas de validación.

Modelo	R^2	RMSE
Polinomio	0.9688	37.94 kW
Red neuronal	0.9845	26.78 kW

DISCUSIÓN

Se logró una capacidad predictiva para la turbina Vestas V52, validada mediante métricas de correlación a partir de datos experimentales en condiciones de operación. La incorporación de parámetros de funcionamiento, tales como la velocidad del viento y la temperatura ambiente, permitió mejorar la capacidad predictiva del modelo, lo que contribuye al desarrollo de la investigación en sistemas de generación eólica.

Si bien diversos modelos de redes neuronales artificiales (ANN) reportados en la literatura alcanzan coeficientes de determinación cercanos a 0.99 (**Tabla 6**), ambos modelos desarrollados en este estudio pueden mejorar significativamente su capacidad predictiva mediante la aplicación de filtros matemáticos que reduzcan la influencia de errores de medición y valores atípicos. No obstante, aun sin la aplicación de dichos filtros, el modelo (5) desarrollado en este estudio destaca por su practicidad y facilidad de implementación en entornos de ingeniería, manteniendo una capacidad predictiva competitiva.

Por otra parte, la red neuronal presentó un RMSE altamente competitivo al compararse con algoritmos de alto desempeño, como Random Forest y Multilayer Perceptron [3]. En conjunto, ambos modelos constituyen herramientas precisas y fiables para la predicción de la potencia eléctrica en la turbina Vestas V52.

Tabla 6. Métricas de desempeño reportadas en estudios relacionados.

Algoritmo	RMSE	R^2
Random Forest [3]	75.52	0.989
Decision Tree [3]	94.94	0.975
XGB [3]	102.91	0.970
Light GBM [3]	113.97	0.951
MLPerceptron [3]	175.57	0.991
Stacking [3]	85.31	0.983
Voting [3]	93.04	0.977
Physics-based [2]	30.58	0.995
Data-based [2]	25.04	0.996
Hybrid [2]	24.48	0.997

CONCLUSIÓN

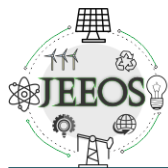
Se desarrollaron dos modelos de predicción de potencia eléctrica en una turbina Vestas V52. El modelo de red neuronal alcanzó un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9845$ y un RMSE de 26.78 kW debido a su metodología enfocada en aumentar la precisión mediante la normalización z-score, el uso de la función de activación ReLU y el algoritmo de optimización Adam, mientras

que el modelo polinomial obtuvo un $R^2 = 0.9688$ y un RMSE de 37.94 kW, el cual permite una estimación inmediata de la potencia mediante la sustitución directa de las variables de entrada.

REFERENCIAS

- [1] Agoundedemba, M., Nyenge, R., Musila, N., N'Zi Toure, K. J.-Y., Kim, C. K., & Kim, H.-G. (2026). Improving accuracy of wind speed forecasted with power law and multiple layer perceptron: a case study of Aneho, a coastal area of Togo. *Energy Conversion and Management*: X, 30, 101674. Fecha de consulta: 5 de febrero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174526001571>
- [2] Allal, Z., Noura, H. N., Salman, O., & Chahine, K. (2025). Machine learning-based prediction model of wind turbine power generation. *Cleaner Energy Systems*, 12, 100218. Fecha de consulta: 30 de enero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772783125000494>
- [3] Astolfi, D., Celesti, L., Vedovelli, M., Lombardi, A., & Terzi, L. (2022). Data-Driven Assessment of Wind Turbine Performance Decline with Age and Interpretation Based on Comparative Test Case Analysis. *Sensors*, 22, 3180. Fecha de consulta: 20 de enero de 2026. https://www.researchgate.net/publication/360112207_Data-Driven_Assessment_of_Wind_Turbine_Performance_Decline_with_Age_and_Interpretation_Based_on_Comparative_Test_Case_Analysis
- [4] Byrne, R., & MacArtain, P. (2023). Multi-annual time series operational data for a Vestas V52 wind turbine located in a coastal peri-urban environment in Ireland. *Data in Brief*, 48, 109227. Fecha de consulta: 4 de febrero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340923003463>
- [5] Camacho-Catemaxca, E., Escobedo-Trujillo, B., Alaffita, F., & Herrera-Romero, J. (2025). Polynomial regression model for the prediction of thermal efficiency in spark ignition engines operating with ethanol-water mixtures. *Revista de Ingeniería Mecánica*. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2026. https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ingenieria_Mecanica/vol9num22/Journal_of_Mechanical_Engineering_V9_N22_4.pdf
- [6] Escobedo-Trujillo, B. A., Alaffita-Hernández, F. A., Colorado, D., & Siqueiros, J. (2014). Coefficient of performance prediction by a polynomial model of absorption heat transformer. Fecha de consulta: 4 de febrero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116324334>
- [7] Escobedo-Trujillo, B. A., Colorado, D., Rivera, W., & Alaffita-Hernández, F. A. (2016). Neural network and polynomial model to improve the coefficient of performance prediction for solar intermittent refrigeration system. *Solar Energy*, 129, 28-37. Fecha de consulta: 2 de febrero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16000657>

- [8] Gijón, A., Eiraudó, S., Manjavacas, A., Salvatore-Schiera, D., Molina-Solana, M., & Gómez-Romero, J. (2025). Integrating physics and data-driven approaches: An explainable and uncertainty-aware hybrid model for wind turbine power prediction. *Computer Physics Communications*, 316, 109761. Fecha de consulta: 4 de febrero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465525002632>
- [9] Guelleh, H. O., Patel, R., & Mujtaba, I. M. (2026). Renewable energy transition in sub-Saharan Africa: Opportunity for wind energy in Djibouti. *Journal of Cleaner Production*, 545, 147732. Fecha de consulta: 10 de enero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652626002714>
- [10] Haque, A., & Rahman, S. (2022). Short-term electrical load forecasting through heuristic configuration of regularized deep neural network. *Applied Soft Computing*, 122, 108877. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494622002575>
- [11] Kim, Y. S., Kim, M. K., Fu, N., Liu, J., Wang, J., & Srebric, J. (2025). Investigating the impact of data normalization methods on predicting electricity consumption in a building using different artificial neural network models. *Sustainable Cities and Society*, 118, 105570. Fecha de consulta: 7 de febrero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670724003962>
- [12] Montgomery, D. C. (2009). The Histogram y The Normal Distribution. En: *Introduction to Statistical Quality Control* (pp. 66-86). John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey.
- [13] Pei, F., Zhang, B., Long, S., & Yuan, M. (2026). BiLSTM-PINN-based wind turbine power prediction architecture and anomaly data identification. *Renewable Energy*, 261, 125182. Fecha de consulta: 8 de febrero de 2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148126000078>
- [14] Pelletier, F., Masson, C., & Tahan, A. (2016). Wind turbine power curve modelling using artificial neural network. *Renewable Energy*, 89, 203-214. Fecha de consulta: 29 de enero de 2026. https://www.researchgate.net/publication/291012629_Wind_turbine_power_curve_modelling_using_artificial_neural_network



Estrategias de ingeniería de software verde para aplicaciones energéticamente eficientes

Green software engineering strategies for energy-efficient applications

Morales-Reyes E.^{1*}, Pacheco-Reyes J.N.¹, Vázquez-Hernández R.¹, Gilbón-Aburto A.¹, Gómez-Manuel E.¹

¹Universidad Tecnológica del Sureste de Veracruz (UTSV), avenida Universidad Tecnológica Lote Grande No. 1,
CP 96360, Nanchital, Veracruz, México.

*eunice.morales@utsv.edu.mx

Artículo Científico

Publicado: 31 de agosto 2026

RESUMEN

El crecimiento sostenido de las tecnologías de la información ha incrementado el consumo energético asociado al software, generando interés en enfoques orientados a la sostenibilidad computacional. En este contexto, la ingeniería de software verde propone integrar criterios de eficiencia energética dentro del desarrollo de sistemas digitales. El presente trabajo tiene como objetivo analizar las implicaciones de sostenibilidad energética derivadas del comportamiento de distintos lenguajes de programación mediante un análisis secundario de resultados experimentales previamente publicados en la literatura científica. Para ello, se examinan métricas comparativas de consumo energético, tiempo de ejecución y uso de memoria reportadas en estudios empíricos basados en benchmarks computacionales equivalentes. A partir de la reinterpretación de dichos resultados desde una perspectiva de sostenibilidad del software, se identifican patrones consistentes entre el tipo de ejecución del lenguaje y su eficiencia energética relativa. El análisis evidencia que los lenguajes compilados presentan menores niveles de consumo energético en comparación con lenguajes interpretados o ejecutados sobre máquinas virtuales, aunque la eficiencia final depende también del diseño algorítmico y de las prácticas de desarrollo. Como principal aportación, el estudio propone integrar la eficiencia energética como criterio de decisión dentro de la ingeniería de software, contribuyendo a la construcción de sistemas más sostenibles sin necesidad de realizar nuevas mediciones experimentales. Estos elementos muestran que el análisis de evidencia empírica existente constituye un enfoque válido para orientar prácticas de desarrollo alineadas con la sostenibilidad tecnológica.

Palabras clave: eficiencia energética; sostenibilidad del software; lenguajes de programación; consumo energético; ingeniería de software verde.

ABSTRACT

The sustained growth of information technologies has increased the energy consumption associated with software, generating growing interest in approaches focused on computational sustainability. In this context, green software engineering proposes integrating energy efficiency criteria into the development of digital systems. The objective of this study is to analyze the sustainability implications related to the behavior of different programming languages through a secondary

analysis of experimental results previously reported in the scientific literature. To this end, comparative metrics of energy consumption, execution time, and memory usage reported in empirical studies based on equivalent computational benchmarks are examined. By reinterpreting these results from a software sustainability perspective, consistent patterns are identified between the execution model of programming languages and their relative energy efficiency. The analysis shows that compiled languages tend to exhibit lower levels of energy consumption compared to interpreted languages or those running on virtual machines, although overall efficiency also depends on algorithm design and development practices. As a main contribution, this study proposes the integration of energy efficiency as a decision-making criterion within software engineering, contributing to the development of more sustainable systems without requiring new experimental measurements. These findings suggest that analyzing existing empirical evidence is a valid approach for guiding development practices aligned with technological sustainability.

Keywords: energy efficiency; software sustainability; programming languages; energy consumption; green software engineering.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido de las tecnologías de la información y comunicación ha transformado profundamente los procesos sociales, económicos e industriales; sin embargo, este avance tecnológico ha incrementado significativamente el consumo energético asociado a la infraestructura digital y al desarrollo de software. Los sistemas informáticos y servicios digitales representan una fracción creciente del consumo energético global, lo que ha generado preocupación respecto al impacto ambiental derivado de las operaciones computacionales y la emisión indirecta de gases de efecto invernadero [1]. En consecuencia, la sostenibilidad tecnológica ha emergido como un área prioritaria de investigación orientada a reducir la huella ambiental de los sistemas digitales sin comprometer su funcionalidad o rendimiento.

Dentro de este contexto surge la ingeniería de software verde, disciplina que propone integrar criterios de eficiencia energética a lo largo del ciclo de vida del software, desde el diseño hasta la operación y mantenimiento de los sistemas [2]. Diversos estudios han demostrado que decisiones técnicas como la selección del lenguaje de programación, el diseño algorítmico y el modelo de ejecución influyen directamente en el consumo energético de las aplicaciones [2,3,4].

Investigaciones empíricas han evidenciado diferencias significativas en eficiencia energética entre lenguajes de programación al ejecutar tareas computacionales equivalentes [5]. Estos resultados indican que el comportamiento energético del software se encuentra influenciado por características propias del lenguaje y su entorno de ejecución, así como por la forma en que se gestionan los recursos durante la ejecución.

A diferencia de estudios orientados a la medición experimental directa, el presente trabajo adopta un enfoque de análisis secundario basado en la reinterpretación de resultados empíricos previamente reportados en la literatura científica. Este enfoque permite analizar implicaciones

relacionadas con la sostenibilidad energética del software desde una perspectiva integradora, vinculando evidencia cuantitativa existente con principios de ingeniería de software sostenible.

En este contexto, el objetivo del presente estudio es analizar la relación entre los modelos de ejecución de los lenguajes de programación y la eficiencia energética del software mediante la reinterpretación de resultados experimentales reportados en estudios previos, con el fin de identificar implicaciones relevantes para el desarrollo de software sostenible.

METODOLOGÍA

Enfoque metodológico. El presente estudio se desarrolló mediante un enfoque de análisis secundario basado en la revisión e interpretación de resultados experimentales previamente publicados en la literatura científica sobre eficiencia energética de lenguajes de programación. No se realizaron mediciones experimentales propias; en su lugar, se analizaron datos derivados de estudios empíricos con el objetivo de identificar implicaciones relacionadas con la sostenibilidad del software.

El análisis se fundamentó principalmente en los resultados reportados por Pereira et al. [5], quienes evaluaron el comportamiento energético de múltiples lenguajes de programación mediante benchmarks computacionales equivalentes. De manera complementaria, se consideraron revisiones sistemáticas de literatura sobre métricas de software verde con el fin de contextualizar los resultados dentro del marco teórico de la sostenibilidad en ingeniería de software [3,4].

Variables de análisis. Las variables consideradas en el estudio incluyeron:

- Consumo de energía, expresado en joules (J)
- Tiempo de ejecución, medido en milisegundos (ms)
- Uso de memoria, expresado en megabytes (MB)

Estos indicadores permiten evaluar de manera integral la eficiencia energética del software, considerando tanto el desempeño temporal como la utilización de recursos computacionales.

Los valores analizados corresponden a métricas normalizadas reportadas en el estudio base, lo que permite realizar comparaciones relativas entre lenguajes bajo condiciones equivalentes de ejecución.

Fundamentación de medición energética. El cálculo del consumo energético en el estudio de referencia se basa en la relación física:

$$E = T \times P$$

donde E representa la energía consumida, T el tiempo de ejecución y P la potencia promedio utilizada durante la ejecución del programa [5].

Para la obtención de estas mediciones, el estudio original empleó la interfaz Running Average Power Limit (RAPL), tecnología integrada en procesadores Intel que permite estimar el consumo energético del CPU y subsistemas asociados mediante registros de hardware. Este enfoque es ampliamente utilizado en investigaciones sobre eficiencia energética debido a su capacidad para proporcionar mediciones reproducibles bajo condiciones controladas.

Criterios de análisis. El análisis se centró en identificar patrones de comportamiento energético asociados a los diferentes modelos de ejecución de los lenguajes de programación, clasificándolos en lenguajes compilados, interpretados y ejecutados sobre máquinas virtuales. Esta clasificación permitió relacionar las características técnicas de cada lenguaje con su desempeño energético relativo, proporcionando una base para la interpretación de los resultados desde la perspectiva de la ingeniería de software sostenible.

RESULTADOS

El análisis de los datos permite identificar patrones consistentes en la eficiencia energética de los lenguajes de programación en función de su modelo de ejecución. El comportamiento observado indica que la eficiencia energética del software se encuentra estrechamente relacionada con el nivel de abstracción y el tipo de ejecución del lenguaje, incluso cuando se ejecutan tareas computacionales equivalentes.

Los resultados comparativos normalizados se presentan en la **Tabla 1**. Los datos analizados corresponden a resultados experimentales previamente reportados por Pereira et al. [5], utilizados en este trabajo como base empírica para su reinterpretación desde la perspectiva de la sostenibilidad del software.

Los resultados muestran que los lenguajes compilados presentan menores niveles de consumo energético relativo y tiempos de ejecución más reducidos en comparación con los lenguajes interpretados o aquellos que se ejecutan sobre máquinas virtuales. En particular, C, Rust y C++ destacan como las alternativas con mejor desempeño energético, lo cual se relaciona con la compilación directa a código máquina y con un mayor control en la gestión de los recursos del sistema.

Por otra parte, los lenguajes basados en máquinas virtuales, como Java y C#, presentan un comportamiento intermedio, reflejado en un aumento moderado tanto en el consumo energético como en el uso de memoria. Este comportamiento puede vincularse con la sobrecarga adicional que implica la ejecución en entornos gestionados.

Tabla 1. Resultados globales normalizados de eficiencia energética entre lenguajes de programación (Pereira et al., 2017).

Lenguaje	Tipo de ejecución	Energía relativa	Tiempo relativo	Memoria relativa
----------	-------------------	------------------	-----------------	------------------

C	Compilado	1.00	1.00	1.17
Rust	Compilado	1.03	1.04	1.54
C++	Compilado	1.34	1.56	1.34
Ada	Compilado	1.70	1.85	1.47
Java	Máquina virtual (JVM)	1.98	1.89	6.01
Pascal	Compilado	2.14	3.02	1.00
Go	Compilado	3.23	2.83	1.05
C#	Máquina virtual (.NET)	3.14	3.14	2.85
JavaScript	Interpretado/JIT	4.45	6.52	4.59
TypeScript	Transpilado/JIT	21.50	46.20	4.69
PHP	Interpretado	29.30	27.64	2.57
Python	Interpretado	75.88	71.90	2.80
Ruby	Interpretado	59.34	69.91	3.97
Lua	Interpretado	45.98	82.91	6.72
Perl	Interpretado	65.79	79.58	6.62

Nota: Valores correspondientes a medias geométricas normalizadas reportadas por Pereira et al. (2017).

En cambio, los lenguajes interpretados registran los valores más altos de consumo energético relativo y de tiempo de ejecución. Este comportamiento se asocia con los procesos de interpretación dinámica y con mayores niveles de abstracción durante la ejecución de los programas.

De igual manera, se observa que no existe una relación directa entre el uso de memoria y el consumo energético total. Esto indica que la eficiencia energética depende en mayor medida de la forma en que se administran los recursos durante la ejecución, más que de la cantidad de memoria utilizada.

A partir de estos resultados, se puede identificar que la elección del lenguaje de programación influye de manera importante en el consumo energético del software, lo cual debe considerarse dentro del diseño de sistemas orientados a la sostenibilidad.

DISCUSIÓN: EL DILEMA ENTRE DESEMPEÑO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

Los resultados obtenidos permiten cuestionar la idea de que un programa más rápido es necesariamente más eficiente desde el punto de vista energético. Si bien existe una relación estrecha entre el tiempo de ejecución y el consumo energético, el análisis muestra que esta relación no es completamente proporcional. En algunos casos, lenguajes con menor tiempo de ejecución presentan un consumo energético relativamente mayor, lo que sugiere que la potencia utilizada durante la ejecución varía en función del modelo de ejecución y del uso de recursos del sistema [5].

Lo observado coincide con lo reportado en estudios recientes sobre eficiencia energética del software, donde se señala que el consumo energético no depende únicamente del tiempo de ejecución, sino también de factores como la gestión de memoria, la optimización del compilador y

la interacción con el hardware [6]. En este sentido, la eficiencia energética debe entenderse como una propiedad multifactorial que no puede reducirse a una sola métrica de desempeño.

En relación con el uso de memoria, los resultados analizados muestran que no existe una correlación directa entre el consumo máximo de memoria y el consumo energético total. Este hallazgo sugiere que la eficiencia energética depende en mayor medida de la forma en que la memoria es gestionada a lo largo del tiempo que del volumen máximo utilizado. Este comportamiento ha sido identificado en investigaciones previas, donde se destaca la importancia de analizar el comportamiento dinámico de los recursos computacionales en lugar de métricas estáticas aisladas [5].

Por otra parte, el análisis por tipo de ejecución permite observar diferencias claras entre lenguajes compilados, interpretados y ejecutados sobre máquinas virtuales. Los lenguajes compilados presentan ventajas en términos de eficiencia energética debido a su cercanía al hardware y a la ausencia de capas adicionales de abstracción. En contraste, los lenguajes interpretados y aquellos basados en máquinas virtuales introducen una sobrecarga computacional que impacta tanto en el tiempo de ejecución como en el consumo energético. Este fenómeno ha sido ampliamente discutido en la literatura, donde se reconoce que los niveles de abstracción influyen directamente en la eficiencia energética del software [6].

Desde una perspectiva más amplia, estos resultados pueden vincularse con enfoques como Green Business Process Management (Green BPM), el cual propone integrar criterios de sostenibilidad dentro de los procesos organizacionales y tecnológicos [7]. Bajo este enfoque, la eficiencia energética del software no se limita a una optimización técnica, sino que forma parte de una estrategia más amplia orientada a reducir el impacto ambiental de los sistemas de información.

De manera complementaria, el Manifiesto de Karlskrona establece que la sostenibilidad en el desarrollo de software debe abordarse considerando múltiples dimensiones interrelacionadas, incluyendo aspectos técnicos, ambientales, económicos y sociales [8]. En este sentido, la eficiencia energética del software no debe analizarse de forma aislada, sino como parte de un sistema complejo donde las decisiones tecnológicas tienen implicaciones a largo plazo.

Asimismo, investigaciones realizadas recientemente destacan la necesidad de incorporar métricas específicas que permitan evaluar la sostenibilidad del software, lo que refuerza que la eficiencia energética debe integrarse como un criterio dentro del proceso de desarrollo [9]. Estas propuestas coinciden en que la sostenibilidad debe integrarse desde la fase de análisis y diseño del sistema, donde se definen los requerimientos y la arquitectura, en lugar de tratarse como un aspecto posterior. Desde esta perspectiva, la eficiencia energética no depende únicamente del desempeño computacional, sino de una interacción entre el modelo de ejecución, la gestión de recursos y las decisiones de diseño, lo que implica que el desarrollo de software sostenible demanda un enfoque que articule criterios técnicos considerando el uso de materiales reciclables, así como la reducción de residuos electrónicos.

CONCLUSIONES

El análisis realizado muestra que los lenguajes compilados presentan, en general, mayores niveles de eficiencia energética en comparación con lenguajes interpretados o ejecutados sobre máquinas virtuales. No obstante, la eficiencia energética del software no depende exclusivamente del lenguaje utilizado, sino también de factores como el diseño algorítmico, la gestión de recursos y el modelo de ejecución.

También se observa que la relación entre desempeño y consumo energético no es completamente directa, lo que indica que optimizar el tiempo de ejecución no garantiza necesariamente una reducción proporcional en el consumo energético. Este hallazgo refuerza la necesidad de considerar la eficiencia energética como un criterio independiente dentro del proceso de desarrollo de software.

Asimismo, se identifica la necesidad de fortalecer la investigación en torno a la integración de prácticas de sostenibilidad dentro de la ingeniería de software, particularmente en lo relacionado con el uso de herramientas, métricas y marcos de referencia que permitan evaluar el impacto energético del software de manera sistemática.

Desde esta perspectiva, se plantea la importancia de incorporar criterios de sostenibilidad desde las etapas tempranas del desarrollo, de modo que las decisiones técnicas contribuyan a la construcción de sistemas más eficientes y con menor impacto ambiental. Este enfoque resulta especialmente relevante en el contexto actual, donde el crecimiento de los sistemas digitales implica desafíos significativos en términos de consumo energético y sostenibilidad.

REFERENCIAS

- [1] Becker, C., Chitchyan, R., Duboc, L., Easterbrook, S., Penzenstadler, B., Seyff, N., & Venters, C. (2015). Sustainability design and software: The Karlskrona manifesto. In: Proceedings of the 37th International Conference on Software Engineering (ICSE), 467–476. <https://doi.org/10.1109/ICSE.2015.179>
- [2] Belkhir, A., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448–463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>
- [3] Calero, C., Moraga, M. Á., & Bertoa, M. F. (2013). Towards a software product sustainability model. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Green and Sustainable Software (GREENS), 30–36. <https://doi.org/10.1109/GREENS.2013.6606421>
- [4] Chan, H., & Johansson, M. (2014). Green IS: a systematic literature review. University of Borås, Sweden. Disponible en: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1309721/FULLTEXT01.pdf>. Fecha de consulta: marzo de 2026.

- [5] Hilty, L., & Lohmann, W. (2011). The five most neglected issues in Green IT. UPGRADE: The European Journal for the Informatics Professional, 12(4), 12–15.
- [6] Lago, P., Gu, Q., & Bozzelli, P. (2014). A systematic literature review of green software metrics. VU University Amsterdam. Disponible en: <https://research.vu.nl/en/publications/a-systematic-literature-review-of-green-software-metrics/>. Fecha de consulta: marzo de 2026.
- [7] Opitz, N., Krup, H., & Kolbe, L. (2014). Green Business Process Management: A definition and research framework. In: Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 3808–3817. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.475>
- [8] Pereira, R., Couto, M., Ribeiro, F., Rua, R., Cunha, J., Fernandes, J., & Saraiva, J. (2017). Energy efficiency across programming languages. In: Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN International Conference on Software Language Engineering (SLE), 256–267. <https://doi.org/10.1145/3136014.3136031>
- [9] Pinto, G., Castor, F., & Liu, Y. (2014). Understanding energy behaviors of thread management constructs. In: Proceedings of the ACM International Conference on Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications (OOPSLA), 345–360. <https://doi.org/10.1145/2660193.2660201>

Estudio teórico y experimental de la eficiencia térmica de un colector cilindro parabólico en Coatzacoalcos, México.

Theoretical and experimental study of the thermal efficiency of a parabolic trough collector in Coatzacoalcos, Mexico.

Rodríguez-Flores E.¹, González-Martínez M.I.², Fuentes-Orozco S.², Garrido-Meléndez J.³, Márquez-Nolasco A.⁴, Conde-Gutiérrez R.A.^{4*}.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad Km. 7.5, Col. Santa Isabel, 96538 Coatzacoalcos, Veracruz, México.

²Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad Km. 7.5, Col. Santa Isabel, 96538 Coatzacoalcos, Veracruz, México.

³Departamento de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Av. Universidad Km 7.5, Col. Santa Isabel, Coatzacoalcos CP 96538, Veracruz, México.

^{4*}Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables, Universidad Veracruzana, Av. Universidad Km 7.5, Col. Santa Isabel, C.P. 96535 Coatzacoalcos, Veracruz, Mexico.

*roconde@uv.mx

Artículo Científico
Publicado: 31 de agosto 2026

RESUMEN

El uso de la energía solar mediante sistemas de concentración representa una alternativa viable para aplicaciones térmicas de baja entalpía. En este trabajo se evaluó la eficiencia térmica de un colector cilindro parabólico (CCP) bajo las condiciones meteorológicas de la ciudad de Coatzacoalcos, México, mediante un enfoque teórico y experimental. El CCP fue instrumentado para registrar variables operativas y meteorológicas, incluyendo las temperaturas de ambiente, entrada y salida del fluido, la radiación solar global y difusa, velocidad del viento y caudal volumétrico. El colector posee un área de apertura de 2.08 m² con un tubo receptor de cobre y utilizando agua como fluido de trabajo en un circuito cerrado. Una prueba experimental realizada el 30 de septiembre de 2025 entre las 09:00 y 13:00 h fue usada para determinar la eficiencia térmica. El tiempo constante de calentamiento y enfriamiento fueron calculados. La eficiencia teórica del CCP fue determinada a través de diversos parámetros y considerando el diseño del colector. La eficiencia experimental fue determinada siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ANSI/ASHRAE 93-2003. Los resultados muestran una eficiencia térmica experimental máxima de 19.25% bajo una irradiancia directa de 1018.65 W/m². La diferencia entre la eficiencia experimental y la teórica osciló entre 8.17 % y 17 %. Esta discrepancia puede atribuirse principalmente a la inercia térmica inherente al sistema de recirculación utilizado durante las pruebas experimentales.

Palabras clave: Energía solar, colector solar parabólico (CCP), eficiencia térmica, condiciones meteorológicas, Coatzacoalcos.

ABSTRACT

The use of solar energy through concentrating systems represents a viable alternative for low-enthalpy thermal applications. In this work, the thermal efficiency of a parabolic trough collector

(PTC) was evaluated under the meteorological conditions of the city of Coatzacoalcos, Mexico, using a theoretical and experimental approach. The PTC was instrumented to record operational and meteorological variables, including ambient temperatures, fluid inlet and outlet, global and diffuse solar radiation, wind speed and volumetric flow. The collector has an aperture area of 2.08 m² with a copper receiver tube and using water as a working fluid in a closed circuit. An experimental test conducted on September 30, 2025 between 09:00 and 13:00 h was used to determine the thermal efficiency. The constant heating and cooling time were calculated. The theoretical efficiency of the PTC was determined through various parameters and considering the design of the collector. The experimental efficiency was determined following the ANSI/ASHRAE 93-2003 standard. The results show a maximum experimental thermal efficiency of 19.25% under a direct irradiance of 1018.65 W/m². The difference between experimental and theoretical efficiency ranged from 8.16% to 17%, mainly due to the thermal inertia associated with the closed-loop operating conditions.

Keywords: Solar energy, parabolic solar collector, thermal efficiency, weather conditions, Coatzacoalcos.

INTRODUCCIÓN

El planeta recibe de manera constante una magnitud de energía solar que supera en 10,000 veces el consumo global de todos los sistemas energéticos [1]. La radiación, es originada por un flujo de energía solar de 3.9×10^{26} W, donde solo una fracción alcanza la superficie terrestre, pero aun así resulta suficiente para cubrir múltiples veces la demanda energética mundial [2]. Por lo tanto, la energía solar se constituye como una fuente primaria que sustenta la vida en nuestro planeta.

A lo largo de los años, se han desarrollado distintos dispositivos tecnológicos para el aprovechamiento de la radiación solar; entre estas tecnologías destacan los sistemas de concentración solar. Estos dispositivos han adquirido especial relevancia debido a su capacidad de alcanzar altas temperaturas de operación, siendo adecuados para aplicaciones industriales, como: generación de vapor, producción de energía eléctrica, entre otros [3].

El CCP es un dispositivo que se fundamenta en el uso de superficies reflejantes con geometría parabólica para concentrar la radiación directa sobre un receptor tubular situado en la línea focal, permitiendo la transferencia de calor hacia un fluido de trabajo [4].

Los CCP se caracterizan por su estructura longitudinal compuesta por reflectores curvados en forma parabólica. Asimismo, una de sus características geométricas fundamentales es el ángulo de borde, el cual define la curvatura de la superficie reflectante y define la proporción de radiación solar captada que se redirige hacia el tubo absorbedor. El receptor tubular, es un elemento clave del sistema, suele estar diseñado para soportar condiciones térmicas elevadas y minimizar pérdidas energéticas.

El desempeño del colector depende de parámetros como la reflectividad del espejo, la precisión geométrica de la superficie parabólica y el factor de interceptación del receptor, los cuales influyen directamente en la eficiencia óptica del sistema [5]. Asimismo, variables como la velocidad del viento, la temperatura ambiente y la radiación solar incidente repercuten de manera significativa en el comportamiento de la eficiencia térmica del colector. La adecuada integración de estos factores puede mejorar la eficiencia energética del sistema y reducir pérdidas térmicas asociadas a efectos ópticos y convectivos [6].

La relevancia de analizar el desempeño de los CCP ha motivado el desarrollo de investigaciones orientadas hacia enfoques tanto experimentales como numéricos [7]. A nivel internacional, los CCP han sido ampliamente estudiados de manera experimental con el propósito de analizar su desempeño térmico y proponer aplicaciones para satisfacer diversas necesidades. En este contexto, Bharti et al. [8] realizaron un estudio experimental de un CCP evaluando el efecto del material del tubo receptor y del flujo del fluido de trabajo, reportando una eficiencia térmica máxima cercana al 35.90 %. Por otra parte, en México estos dispositivos han sido analizados en diferentes estudios enfocados en su aplicación en procesos de baja entalpía. Jaramillo et al. [9] evaluaron el desempeño de concentradores cilindro-parabólicos para procesos térmicos de baja temperatura, destacando su potencial en el aprovechamiento de energía solar. Asimismo, investigaciones experimentales realizadas en Yucatán, México, han analizado la eficiencia de CCP utilizados como sistemas de calentamiento de agua, evidenciando resultados favorables en términos de eficiencia térmica y desempeño energético [10].

Con la información previa, el presente estudio tiene como objetivo el determinar la eficiencia térmica de un CCP considerando las condiciones meteorológicas de la ciudad de Coatzacoalcos, México, mediante un enfoque teórico y experimental. Esta investigación puede contribuir en generar información relevante sobre la evaluación de este tipo de colectores en zonas tropicales del golfo en México. Además, proporcionar una comparación con la eficiencia térmica teórica del CCP a partir de parámetros relevantes como la eficiencia óptica, transferencia de calor del tubo receptor, entre otros.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El fundamento de la operación del CCP consiste en concentrar la irradiancia normal directa (IND) en un receptor tubular, donde el flujo radiante es absorbido y transferido en forma de calor al fluido de trabajo, elevando así su energía térmica y temperatura. El tubo receptor empleado está fabricado en cobre, material seleccionado por su alta conductividad térmica [8].

La instalación del CCP integra sensores para el registro continuo de variables operativas y meteorológicas, tales como las temperaturas de entrada y salida del fluido, la temperatura ambiente, la irradiancia solar difusa y solar, velocidad y dirección del viento, así como caudal volumétrico, con el fin de caracterizar el rendimiento del sistema.

El CCP fue rotado sobre un eje horizontal de orientación este-oeste, realizando un ajuste en el plano norte-sur con el objetivo de minimizar el ángulo de incidencia.

En la **Figura 1**, se muestra el CCP instrumentado para su evaluación experimental, utilizando agua como fluido de trabajo. El sistema fue instalado en las coordenadas 18.1443093° N de latitud y -94.476728° W de longitud, a una altitud de 10 metros sobre el nivel del mar, correspondientes a la Universidad Veracruzana, campus Coatzacoalcos, en el estado de Veracruz, México.



Figura 1. Colector cilindro-parabólico experimental.

La **Tabla 1**, describe los valores de incertidumbre y otras características relevantes de los instrumentos de medición presentados en la **Figura 1**.

Tabla 1. Características de los instrumentos de medición instalados en el CCP obtenidos de [19].

Instrumentos	Medición de variables	Características	Incertidumbre
Termopares tipo - T	Medioambiente, entrada y salida de agua	0 – 105 °C	±0.5 °C
Rotámetro	Flujo volumétrico de agua	0 – 4 L/min	2.4 %
Piranómetro con sombra	Irradiancia solar difusa	Sensibilidad $17.29 \times 10^{-6} \text{ V/(W/m}^2\text{)}$	1.8 %
Piranómetro	Irradiancia solar global	Sensibilidad $10.24 \times 10^{-6} \text{ V/(W/m}^2\text{)}$	2%
Anemómetro	Velocidad y dirección del viento	Rango: 0 – 60 m/s (velocidad del viento) y 0 – 359 °(dirección del viento)	Velocidad del viento 2 % y dirección del viento 2%

METODOLOGÍA

Estructura física del CCP. Este trabajo de investigación está basado en la construcción e instalación del CCP reportado por Márquez-Nolasco et al., 2026, donde la estructura fue fabricada en acero inoxidable 304L, empleando una película reflectante 3M Solar Mirror Film 1100 con una reflectancia superior al 90%. En cuanto al absorbedor, se utiliza un tubo de cobre recubierto con pintura Pyromark 2500, con un coeficiente de absortividad de 0.95.

Determinación del tiempo constante. El tiempo constante (τ) de calentamiento se define como el tiempo requerido para que la temperatura de salida del colector alcance el 63.20 % del incremento total entre la condición inicial y el estado estacionario. El procedimiento se realizó conforme a la norma ANSI/ASHRAE 93-2003 [9,11].

Iniciando con el sistema desenfocado y el fluido aproximadamente a temperatura ambiente. Tras alcanzar el equilibrio inicial, la parábola se enfoca, registrando la temperatura hasta lograr un nuevo estado estable. El valor de τ se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{T_o - T_{o,t}}{T_o - T_i} = \frac{1}{e} = 0.368 \quad (1)$$

Donde T_i es la temperatura del agua de entrada al colector, T_o es la temperatura final del agua de salida del colector y $T_{o,t}$ es la temperatura del agua de salida del colector después de un tiempo t . Mediante la cual se determina el tiempo constante de calentamiento.

Por otro lado, para determinar τ de enfriamiento, el colector se opera manteniendo la temperatura del fluido de entrada igual a la temperatura de ambiente. En este caso, la energía solar incidente se reduce abruptamente a cero mediante el desenfoque del colector. Las temperaturas del fluido de transferencia se monitorean continuamente en función del tiempo hasta que satisfaga la siguiente relación:

$$\frac{T_{o,t} - T_i}{T_{oi} - T_i} = \frac{1}{e} \approx 0.368 \quad (2)$$

Donde T_{oi} es la temperatura inicial de salida del agua del colector al momento del desenfoque. En este caso, τ se define como el periodo necesario para que la temperatura de salida del colector disminuya un 63.20 % del incremento total por encima de la temperatura ambiente (T_a), tras la reducción súbita de la irradiancia solar en el tiempo cero.

RENDIMIENTO TEÓRICO DEL CCP

Rendimiento óptico. Este valor puede ser definido como la porción de radiación solar que logra absorber efectivamente el CCP tomando en cuenta factores como la reflexión o absorción del

receptor y factores geométricos que ajustan la eficiencia óptica compensando reducciones efectivas al área de apertura causadas por efectos geométricos no considerados. Por consiguiente, el rendimiento óptico (η_o) puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación [12]:

$$\eta_o = \rho \tau \alpha \gamma [(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta)] \quad (3)$$

Donde A_f es el factor geométrico (factor de forma del colector), θ es el ángulo de incidencia, ρ la reflectancia, α define la absorptancia del tubo receptor y τ es la transmitancia que es considerada solo cuando el tubo receptor tiene una cubierta (no válido para este caso). La **Tabla 2** muestra las variables de construcción del CCP y utilizadas para el cálculo del rendimiento óptico.

Tabla 2. Parámetros de construcción del CCP.

Parámetros	Valor	Símbolo
Apertura	1.040 m	Wa
Longitud	2.000 m	L
Diámetro externo	0.035 m	Do
Diámetro interno	0.032 m	Di
Ángulo de borde	90°	φ_r

El factor geométrico puede ser calculado por:

$$A_f = \frac{A_l}{A_a} \quad (4)$$

Donde A_l es definida por el área perdida y A_a el área de apertura del CCP ($Wa \cdot L$). Estos valores se muestran en la **Tabla 3**. La determinación de A_l se puede obtener a partir de la siguiente ecuación [13]:

$$A_l = \frac{2}{3} Wahp + fWa \left[1 + \frac{Wa^2}{48f^2} \right] \quad (5)$$

Donde hp define la altura de la parábola y f define la distancia focal, estos parámetros se muestran en la **Tabla 3**, calculados a partir de las ecuaciones [14]:

$$f = \frac{Wa}{4 \tan(\frac{\varphi_r}{2})} \quad (6)$$

$$hp = 4f \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{1 + \cos(\varphi_r)}{2 \sin(\varphi_r)} \int_0^{\varphi_r} \frac{\text{erf}(M) - \text{erf}(N)}{1 + \cos(\varphi_r)} d\varphi \quad (8)$$

Donde $\text{erf}()$ son una función de error de M y N establecida:

$$M = \frac{\sin(\varphi_r)(1+\cos(\varphi))(1-2d^*\sin(\varphi))-\pi\beta^*(1+\cos(\varphi_r))}{\sqrt{2}\pi\sigma^*(1+\cos(\varphi_r))} \quad (9)$$

$$N = -\frac{\sin(\varphi_r)(1+\cos(\varphi))(1+2d^*\sin(\varphi))+\pi\beta^*(1+\cos(\varphi_r))}{\sqrt{2}\pi\sigma^*(1+\cos(\varphi_r))} \quad (10)$$

El factor de intercepción (γ) es una fracción de los rayos reflejados por el absorbedor al receptor, el cual depende del tamaño del receptor y se da por la siguiente expresión [15]:

Donde d^* se puede expresar como un parámetro de error no aleatorio universal debido a la desubicación del receptor ($d^* = Dr/D$), β^* un parámetro de error no aleatorio universal por errores angulares ($\beta^* = \beta C_o$), σ^* un error aleatorio universal ($\sigma^* = \sigma C_o$), D el diámetro externo del receptor y D_r un desplazamiento del receptor desde la línea focal. La razón de concentración (C_o) es un parámetro geométrico que mide la capacidad del colector para concentrar la radiación solar sobre el tubo receptor. Se define como la relación entre el área de apertura del colector (A_a) y el área externa del receptor (A_r). Su cálculo se determina mediante la siguiente ecuación [14]:

$$C_o = \frac{A_a}{A_r} \quad (11)$$

Tabla 3. Valores geométricos del CCP.

Parámetros	Valor	Símbolo
Factor geométrico	0.520	A_f
Área pérdida	1.081 m^2	A_l
Área de apertura	2.080 m^2	A_a
Foco	0.260 m	f
Altura de Parábola	1.040 m	hp

El área de recepción (A_r) es el área que recibe la energía solar antes de que sea reflejada al tubo receptor por los espejos parabólicos ($2\pi rL$). Mientras, el error aleatorio (σ) se determina estadísticamente y se modela la desviación estándar de la distribución total de la energía reflejada [16], calculada a partir de la ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + \sigma_{slope}^2 + \sigma_{mirror}^2} \quad (12)$$

De acuerdo con Güven y Bannerot [15] para un colector, define $\sigma_{mirror} = 0.002$ radiación (rad) mide la uniformidad de reflectancia en la superficie del espejo parabólico, $\sigma_{slope} = 0.004$ rad cuantifica la desviación angular por imperfecciones en el espejo y el ángulo del cono solar $\sigma_{sun} = 0.004$ rad representa la dispersión natural de radiación solar. En este caso se adoptan valores $\sigma_{mirror} = 0.004$ rad, $\sigma_{slope} = 0.009$ rad y $\sigma_{sun} = 0.004$ rad. El resultado del error aleatorio se

presenta junto a otros parámetros calculados derivados al rendimiento óptico. En la **Tabla 4** se muestra el valor de la eficiencia óptica, así como los parámetros utilizados para su respectivo cálculo.

Tabla 4. Parámetros para el cálculo del rendimiento óptico.

Parámetros	Valor	Símbolo
Día del año	273	d
Diámetro del receptor	0.01 m	D_r
Razón de concentración	21.53	C_o
Área de recepción	0.09 m^2	A_r
Error aleatorio	0.02	σ^*
Ángulo de incidencia	86.14°	θ
Ángulo horario	88.79°	w
Ángulo de declinación	-3.66°	δ
Emisividad	0.94	ε
Factor de intercepción	0.39	γ
Reflectancia	0.95	ρ
Absortancia	0.96	α
Eficiencia óptica	17.54 %	η_o

Eficiencia térmica teórica. Este valor corresponde a una fracción de energía solar que puede ser usada como energía térmica útil transferida. Esta ecuación se puede determinar por la siguiente expresión [14]:

$$\eta_t = F_r \eta_o - F_r \left(\frac{U_L}{C_o} \right) \left[\frac{\Delta T}{G_b} \right] \quad (13)$$

Donde η_o es la eficiencia óptica, U_L cuantifica las pérdidas totales (convección, radiación, conducción), F_r indica la porción de remoción de calor del absorbedor ajustando la eficiencia térmica real, la G_b representa la cantidad de radiación solar directa, $\Delta T = T_i - T_a$ considera la diferencia entre la temperatura de entrada al receptor y la ambiental. El factor de remoción de calor (F_r) se puede calcular a partir de la ecuación:

$$F_r = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L F' A_r}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (14)$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo másico, C_p indica el calor específico del fluido y F' es el factor eficiente del captador que indica la cantidad de radiación solar que se aprovecha de forma útil y que se puede determinar por [15]:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{Do}{h_w Di} + \frac{Do}{2k_w} + \frac{Do}{Di}} \quad (15)$$

La **Tabla 5** muestra parámetros importantes para el cálculo de U_L , F' y F_r , para obtener finalmente la eficiencia del colector (η_l).

Así mismo, aplicando los parámetros calculados en este trabajo a la Ecuación (16), la eficiencia térmica teórica (η_l) puede quedar planteada a partir de la siguiente ecuación:

$$\eta_l = 0.1602 - 0.9543 \left[\frac{\Delta T}{G_b} \right] \quad (16)$$

Tabla 5. Parámetros calculo rendimiento térmico.

Parámetro	Valor	Símbolo
Coeficiente radiactivo	7.72 W/m ² K	h_r
Coeficiente convectivo del aire	14.78 W/m ² K	h_v
Coeficiente convectivo del agua	715.96 W/m ² K	h_w
Temperatura ambiente	308.26 K	T_a
Conductividad del aire	0.02 W/m-K	k_v
Conductividad del agua	0.64 W/m-K	k_w
Temperatura superficie receptor	330.87 K	T_r
Temperatura entrada	323.94 K	T_i
Temperatura salida	325.64 K	T_o
Radiación directa	816.08 W/m ²	G_b
Calor específico	4178.77 kJ/kg-K	C_p
Flujo másico	0.04 kg/s	$\dot{m}$
Factor eficiente del captador	0.91	F'
Factor remoción de calor	0.91	F_r
Coeficiente global de perdidas	22.51	U_L
Numero de Reynolds aire	1944.81	Re_v
Numero de Reynolds agua	2918.26	Re_w
Numero de Nusselt aire	20.28	Nu_v
Numero de Nusselt agua	35.99	Nu_w
Eficiencia térmica	14.18%	η_l

Eficiencia térmica. La eficiencia térmica del colector sirve para evaluar su desempeño, ya que permite cuantificar la fracción de la radiación solar incidente que es transformada en energía térmica útil. El procedimiento para la determinación de la eficiencia térmica (η_g) se fundamenta en los criterios de estabilidad de la norma ANSI/ASHRAE 93-2003 [11]. Para ello, los experimentos se llevaron a cabo bajo un ángulo de incidencia normal respecto al plano del colector, estableciendo una distribución de temperaturas de entrada de 35, 40, 45 y 50 °C. Durante las pruebas, se mantuvo un flujo másico constante de 0.022 kg/s, valor seleccionado para cumplir con la recomendación de la norma de estandarizar el flujo a 0.02 kg/(s · m²) por unidad de área de apertura para fluidos líquidos. La eficiencia se evaluó experimentalmente mediante la relación entre el calor útil ganado y la energía solar incidente, considerando la siguiente expresión:

$$\eta_g = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{G_{bp}A_a} \quad (17)$$

Donde T_i es la temperatura de entrada del colector, T_o es la temperatura de salida del colector.

Resultados

El estudio experimental del CCP se realizó el 30 de septiembre de 2025, en un intervalo comprendido entre 09:00 y 13:00 h.

En la **Tabla 6** se presentan los valores correspondientes al τ para determinar el calentamiento y enfriamiento del sistema, así como las temperaturas registradas durante dichas etapas.

Tabla 6. Tiempo constante de calentamiento y enfriamiento.

Calentamiento	Enfriamiento
48 s	40 s
$T_i = 32.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_i = 32.40 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$T_o = 34.00 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_o = 34.10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
$T_{o,t} = 33.20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{o,t} = 33.00 \text{ }^{\circ}\text{C}$

La **Figura 2** presenta la naturaleza exponencial de la constante de tiempo el CCP. Como se observa, la T_o presenta un incremento más pronunciado en comparación con la T_i , lo cual indica la absorción de energía térmica por parte del fluido de trabajo en el calentamiento. Mientras en el enfriamiento, se aprecia el efecto contrario por el desenfoque de la parábola.

La **Figura 3** presenta el comportamiento temporal de la radiación solar global (G_t) y difusa registradas durante el periodo de medición. Se observó que la irradiancia global tuvo un incremento gradual durante la mañana hasta alcanzar un máximo al mediodía, seguido de una disminución progresiva durante la tarde, lo cual corresponde al ciclo natural de la radiación solar. Por otro lado, la irradiancia difusa (G_d) mantiene valores considerablemente menores y presenta variaciones más suaves, asociadas a los procesos de dispersión de la radiación en la atmósfera.

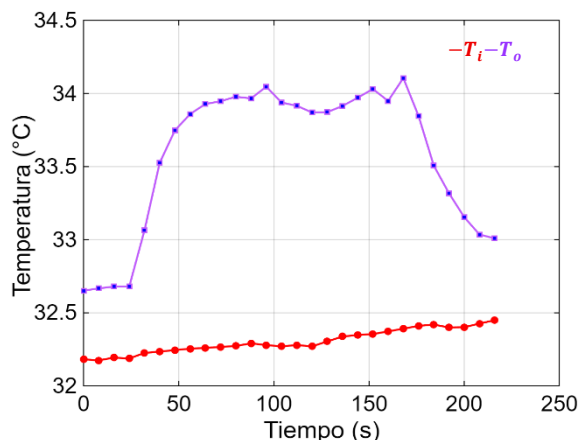


Figura 2. Evaluación del tiempo constante.

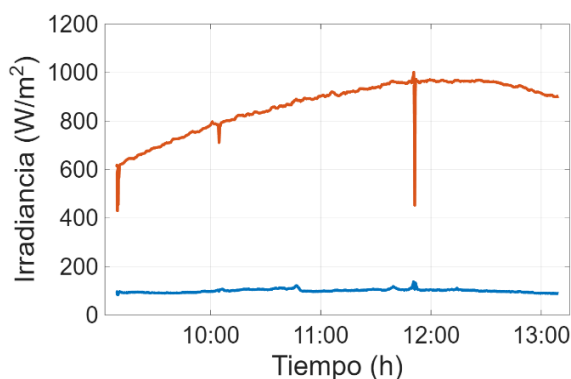


Figura 3. Comportamiento de la radiación global y difusa el 30 de septiembre de 2025

En la **Figura 4** se muestra la relación entre la eficiencia térmica del colector (η_g) y el parámetro adimensional $\Delta T/G_b$ (donde ΔT corresponde a $T_i - T_a$), comparando el comportamiento teórico con los datos experimentales. La diferencia observada entre la eficiencia térmica teórica y experimental puede atribuirse no solamente a la inercia térmica del sistema, sino también a factores asociados con las simplificaciones inherentes al modelo teórico empleado. Entre estos factores destacan las fluctuaciones de la irradiancia solar, variaciones en la velocidad del viento, pérdidas térmicas no consideradas y posibles incertidumbres asociadas a los instrumentos de medición. Debido a que el sistema opera bajo condiciones ambientales reales, resulta complejo reproducir experimentalmente las condiciones ideales asumidas por el modelo teórico. La tendencia experimental presenta un buen ajuste lineal ($R^2 \approx 0.9905$). Para cuantificar la diferencia entre el rendimiento experimental y el teórico se aplicó el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE, por sus siglas en inglés [17]), obteniendo un valor de inicial de 17 % y un valor final de 8.17%. Por lo tanto, es posible observar una mayor separación entre la eficiencia experimental y teórica al inicio de la prueba y un efecto contrario al final de la misma.

Por otra parte, el cálculo de la eficiencia en estado estacionario es menor al reportado por el método experimental, esto se debe a que es afectado por suponer que todas las variables permanecen constantes durante el período de medición y que el sistema ha alcanzado el equilibrio térmico. Sin embargo, las variables meteorológicas son completamente dependiente del tiempo. Por lo tanto, el cálculo de la eficiencia en estado estacionario puede representar con discrepancias el comportamiento real del colector durante condiciones transitorias. En esta investigación, el cálculo de eficiencia en estado estacionario fue aplicado para simplificar el análisis y la comparación entre colectores. No obstante, se propone a futuro desarrollar modelos dinámicos para aproximar la eficiencia real del sistema considerando las condiciones ambientales que evolucionan con el tiempo.

En la **Figura 5**, se observa un incremento gradual en T_i , asociado a la recirculación del fluido dentro del sistema. Por lo tanto, la eficiencia experimental se ve favorecida por la inercia térmica del ciclo cerrado y esta disminuye cuando se incrementa la temperatura de entrada del receptor, provocando que el rendimiento teórico se aproxime al experimental.

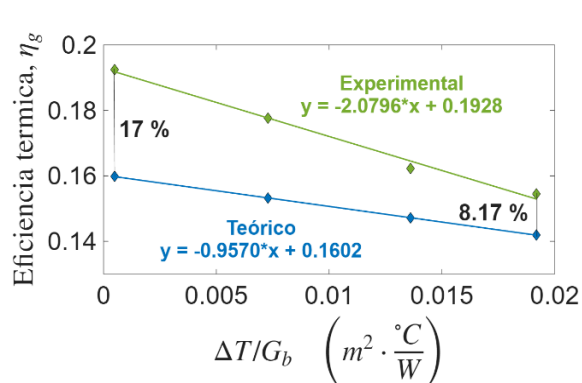


Figura 4. Eficiencia térmica del estudio teórico y experimental.

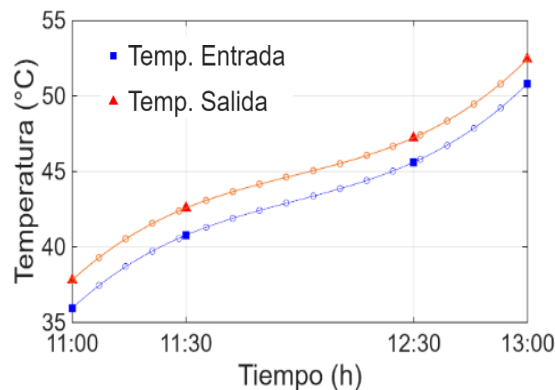


Figura 5. Registro de temperaturas del sistema.

La **Figura 6** presenta la evolución simultánea de la irradiancia solar global y la temperatura de salida del fluido de trabajo durante la evaluación experimental del CCP. Se observa que el incremento de la irradiancia favorece el aumento de la temperatura de salida; sin embargo, la respuesta térmica del sistema no es inmediata. Este comportamiento se atribuye a la inercia térmica del colector y del fluido de trabajo, los cuales almacenan parte de la energía absorbida y la liberan de forma gradual, evidenciando el comportamiento dinámico del proceso de transferencia de calor.

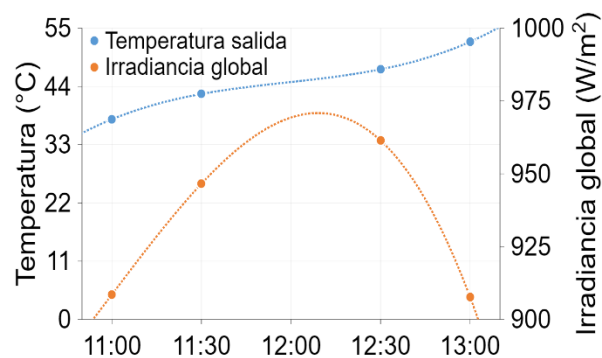


Figura 6. Relación entre la irradiancia solar global y la temperatura de salida del CCP.

Para situar la eficiencia del CCP, en la **Tabla 7** se presenta una comparativa con otros sistemas publicados a nivel internacional. La eficiencia térmica más elevada corresponder a Jaramillo et al. [9], quien alcanza 67% mediante una configuración geométrica rigurosa. En segundo término, la investigación desarrollada en la India por Bharti et al. registra una eficiencia del 35.90% al emplear

un receptor de acero inoxidable. Por su parte, la presente investigación reporta una eficiencia cercana al 19.25% para el CCP, operado en condiciones climatológicas de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México. El valor máximo alcanzado al inicio de la prueba experimental se debe a la formulación de la eficiencia instantánea, donde la potencia térmica útil entregada al fluido inicialmente es mayor debido a que la energía absorbida no solo se transfiere al fluido, sino que también se almacena en el sistema por efecto de la inercia térmica, lo cual se refleja en la elevación continua de la temperatura del tanque. Otro factor importante radica en las condiciones iniciales de la prueba, la temperatura de entrada en el colector es relativamente cercana a la temperatura ambiente, generando que las pérdidas de calor por convección y radiación sean menores. Por lo tanto, una mayor fracción de la energía absorbida puede convertirse en calor útil.

Tabla 7. Comparativa de parámetros técnicos y operativos de diversos CCP.

Referencia	Eficiencia térmica	Radiación (W/m^2)	Flujo masico (kg/s)	Estructura	Tubo receptor	Ángulo de borde
Jaramillo et al. [9] (Temixco, México)	67 %	896.30	0.007	Estructura y costillas de aluminio	Cobre pintado de negro (Ø 25.4 mm) sin cubierta de vidrio	90°
Bharti et al. [8] (India)	35.90 %	950	0.020	Reflector de acero inoxidable	Acero Inoxidable (Ø 1 pulgada)	80°
Presente estudio (Coatzacoalcos, México)	19.25 %	1018.65	0.020	Acero inoxidable 304L	Cobre con pintura Pyromark 2500 (Ø 38 mm)	90°
Calderón Bacón [18] (Lambayeque, Perú)	16.77 %	1044.10	-	Acero inoxidable y varillas de fierro	Cobre pintado de negro (Ø 6 mm, espesor 1 mm)	-
Rosado et al. [10] (Yucatán, México)	5.43 %	821	0.020	Lámina de acero inoxidable pulido	Cobre pintado de negro (Ø 3/4 pulgadas) dentro de vidrio de policarbonato	65.56°

Se exhibe una notable superioridad térmica al contrastarse con las configuraciones propuestas por Calderón et al. y Rosado et al. [10, 18], cuyas eficiencias se sitúan en 16.77 % y 5.43 %, respectivamente. Por lo tanto, la eficiencia presentada en este trabajo es competitiva ya que la radiación solar incidente fue transformada en energía térmica útil de mejor manera, lo que refleja un diseño más adecuado y una correcta selección de materiales y parámetros de operación. La diferencia a favor de la actual propuesta con respecto a los otros colectores con tubo desnudo radica en gran medida en el dimensionamiento estructural del CCP. En específico, el presente estudio al reportar un ángulo de borde mayor, esto le permite tener más capacidad de captación de la radiación reflejada, logrando que los rayos que inciden sobre el tubo receptor aumenten. Otra diferencia, son

los materiales elegidos para la construcción del sistema, los cuales están basados en reflejar la mayor cantidad de radiación solar dirigida hacia el tubo receptor y la aplicación de una pintura especializada para absorber la mayor cantidad de energía solar [19]. Además, las condiciones meteorológicas de la región pueden proporcionar un beneficio debido a las características de la radiación solar en la región costera.

Finalmente, en este trabajo se identifican dos factores clave para mejorar el diseño del sistema y, en consecuencia, su desempeño. El primero, aplicar una cubierta de vidrio al vacío para producir un efecto invernadero capaz de incrementar la temperatura del receptor y mejorar la eficiencia térmica. El segundo, instalar un sistema de seguimiento solar que permite al colector mantener una orientación adecuada respecto al sol durante el día, incrementando la radiación solar directa incidente sobre el reflector. Estos factores no fueron integrados debido a limitaciones de recursos económicos; sin embargo, en trabajos futuros se contempla su adquisición con el fin de dar continuidad al desarrollo y mejora operativa del sistema.

CONCLUSIÓN

La evaluación térmica del CCP permitió caracterizar su comportamiento bajo condiciones reales de operación en la ciudad de Coatzacoalcos, México. Los resultados obtenidos evidenciaron un tiempo constante de calentamiento de 48 s y un tiempo de enfriamiento de 40 s, lo que indica una respuesta térmica relativamente rápida del sistema ante cambios en la radiación solar.

La eficiencia térmica máxima alcanzada fue cercana al 19.25%, valor que se encuentra dentro del rango reportado para colectores similares destinados a procesos de baja entalpía. El análisis comparativo con otros desarrollos experimentales mostró que el sistema evaluado presenta un desempeño competitivo, incluso operando con un receptor tubular sin cubierta protectora, lo que implica mayores pérdidas térmicas por convección.

Los datos mostraron un ajuste adecuado para determinar la eficiencia experimental del CCP. Por otra parte, la diferencia entre las eficiencias fue del 8.17% al 17%, siendo inferior el teórico, ya que no considera la inercia térmica del ciclo cerrado. Se recomienda realizar futuras evaluaciones experimentales utilizando configuraciones de ciclo abierto y campañas de medición extendidas durante diferentes condiciones climáticas. Esto permitirá reducir la influencia de la inercia térmica asociada a la recirculación del fluido y mejorar la precisión de la validación experimental del modelo teórico. Finalmente, los resultados obtenidos evidencian la viabilidad del uso de CCP para el aprovechamiento de energía solar térmica en aplicaciones de baja temperatura en regiones tropicales del Golfo de México, aportando información relevante para el diseño y optimización de este tipo de sistemas.

REFERENCIAS

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 93-2003. (2003). Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: Atlanta, GA, USA.
- [2] Bharti, A., Dixit, A., & Paul, B. (2018). Experimental analysis of a solar parabolic trough collector. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(6), 102–112.
- [3] Calderón Bacón, J. L. (2023). Diseño y construcción de un colector cilíndrico parabólico para uso de la energía solar en el calentamiento de agua (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- [4] Camarillo-Peñaranda, J. R., Saavedra-Montes, A. J., & Ramos-Paja, C. A. (2013). Recomendaciones para seleccionar índices para la validación de modelos. *Tecnológicas, edición especial*, 109–122.
- [5] Chekifi, T. (2022). Thermal efficiency enhancement of parabolic trough collectors: a review.
- [6] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [7] Forristall, R. (2003). Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver (NREL/TP-550-34169). National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [8] Güven, H. M., & Bannerot, R. B. (1986). Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries. *Solar Energy*, 36, 535–550.
- [9] Jaramillo, O. A., Venegas-Reyes, E., Aguilar, J. O., Castrejón-García, R., & Sosa-Montemayor, F. (2013). Parabolic trough concentrators for low enthalpy processes. *Renewable Energy*, 60, 529–539.
- [10] Jeter, S. M. (1983). Geometrical effects on the performance of trough collectors. *Solar Energy*, 30, 109–113.
- [11] Kalogirou, S. A. (2009). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295.
- [12] Kalogirou, S. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press. ISBN 978-0-12-374501-9.

- [13] Márquez-Nolasco, A., & Conde-Gutiérrez, R. A. (2026). Datos experimentales de un colector piloto de canal parabólico considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Coatzacoalcos, México. *Data*, 11(1), 17.
- [14] NASA. (2026). Sun-Earth Interactions. Earthdata.
- [15] Pranesh, V., & Kumaresan, V. (2019). Evolution of the 2D CPC solar collector based on the literature survey. *Solar Energy*.
- [16] Rabl, A. (1984). *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York, USA: Oxford University Press. ISBN 0-19-503546-1.
- [17] Rosado Hau, N., & Escalante Soberanis, M. A. (2011). Eficiencia de un colector parabólico como sistema de calentamiento de agua en Yucatán, México. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(6), 063108.
- [18] Sodha, M. S., Mathur, S. S., & Malik, M. A. S. (1984). *Reviews of Renewable Energy Resources*. New Delhi: Wiley Eastern.
- [19] Tejeda Martínez, A., & Gómez-Azpeitia, L. G. (2015). *Prontuario solar de México*. Universidad de Colima & Universidad Veracruzana.

Determinación de la acumulación de metales en *Eichhornia crassipes* para valorización de biomasa**Determination of metal accumulation in *Eichhornia crassipes* for biomass valorization**Benítez-Martínez X. S.¹, Domínguez-Villate W. A.¹, Núñez-Correa S.¹, Morales-Salas L.^{2,3*}¹Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana
Avenida Universidad Veracruzana Km 7.5, Colonia Santa Isabel, 96538 Coatzacoalcos Ver. México.²Facultad de Ingeniería. Universidad Veracruzana
Avenida Universidad Veracruzana Km 7.5, Colonia Santa Isabel, 96538 Coatzacoalcos Ver. México³Tecnológico Nacional de México Campus Coatzacoalcos, ITESCO
Carretera, Antigua a Minatitlán Km 16.5, Reserva Territorial, 96536 Coatzacoalcos, Ver. México

*limos_01@yahoo.com

Artículo Científico**Publicado: 31 de agosto 2026****RESUMEN**

La toxicidad de los metales en cuerpos de aguas representa un riesgo para la salud pública y el ambiente debido a su persistencia y capacidad de bioacumulación. En sistemas acuáticos, como el río Coatzacoalcos, se ha observado una alta proliferación de *Eichhornia crassipes*, especie invasora, asociada a ambientes contaminados. Debido a su abundancia, se evaluó la acumulación de Ni, Cr, Pb, Hg y Cd en esta especie, así como en el agua con el fin de determinar su potencial fitorremediador.

Las muestras fueron recolectadas en el río Coatzacoalcos, en las inmediaciones de la ciudad de Coatzacoalcos, Ver. El *E. crassipes* fue lavado, separado en parte aérea y raíces, secado, triturado y tamizado. Tanto las muestras del agua como las de biomasa vegetal fueron sometidas a digestión ácida con HNO_3 y H_2O_2 ; posteriormente, se filtraron y aforaron para su análisis. La cuantificación de metales se realizó mediante ICP-MS.

Los resultados en agua mostraron concentraciones de Cr (0.0545 mg L^{-1}) y Hg (0.0075 mg L^{-1}) superiores a los límites permisibles establecidos en las normas NOM 127-SSA1-2021 y NOM-001-SEMARNAT-2021, lo que representa un riesgo para la salud humana por su carácter carcinógeno y bioacumulable. En contraste, *E. crassipes* presentó mayor acumulación de Ni, Cr y Pb, atribuida a la presencia de grupos funcionales en su pared celular que favorecen mecanismos como la absorción y el intercambio iónico.

Se concluye que el río Coatzacoalcos excede la normativa mexicana vigente en Hg y Cr, y que el *E. crassipes* actúa como bioindicador eficaz con alto potencial para fitorremediación in situ.

Palabras clave: *Eichhornia crassipes*, fitorremediación, metales pesados.

ABSTRACT

The presence of toxic metals in aquatic systems represents a risk to public health and the environment due to their persistence and potential for bioaccumulation. In the Coatzacoalcos River, a high proliferation of *Eichhornia crassipes*, an invasive aquatic species commonly associated with contaminated environments, has been observed. Given its abundance, the accumulation of Ni, Cr, Pb, Hg, and Cd in *E. crassipes* and the surrounding water was evaluated to assess its potential for phytoremediation.

Samples were collected from the Coatzacoalcos River near the city of Coatzacoalcos, Veracruz, Mexico. *E. crassipes* samples were washed, separated into aerial parts and roots, dried, ground, and sieved. Water and plant biomass samples were subjected to acid digestion using HNO₃ and H₂O₂, followed by filtration and dilution to a defined volume. Metal concentrations were determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

The results showed that Cr and Hg concentrations in water exceeded the permissible limits established by NOM-127-SSA1-2021 and NOM-001-SEMARNAT-2021, indicating potential environmental and human health concerns. In contrast, *E. crassipes* exhibited greater accumulation of Ni, Cr, and Pb, which may be associated with functional groups present in the plant cell wall that facilitate metal uptake and retention through mechanisms such as adsorption and ion exchange. These findings indicate that Cr and Hg concentrations in the Coatzacoalcos River exceed current Mexican regulatory limits and that *E. crassipes* may serve as a useful bioindicator and has potential for in situ phytoremediation of metal-contaminated aquatic environments.

Keywords: *Eichhornia crassipes*; phytoremediation; toxic metals; bioaccumulation; Coatzacoalcos River.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de cuerpos de agua por metales pesados constituye una problemática ambiental a nivel global debido a su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación en los ecosistemas. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados no son degradados por procesos naturales, por lo que permanecen durante largos periodos en el ambiente, acumulándose en sedimentos, organismos acuáticos y cadenas tróficas. Esta característica incrementa el riesgo ecológico y sanitario, ya que pueden incorporarse al organismo humano a través del consumo de agua o alimentos contaminados [1,2]. Entre los metales de mayor relevancia toxicológica se encuentran el mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd) y níquel (Ni), asociados con efectos adversos como estrés oxidativo, alteraciones fisiológicas, daño neurológico y enfermedades crónicas [3].

Las principales fuentes de contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos están relacionadas con actividades antropogénicas como la industria, la minería, la agricultura y las descargas urbanas, como se observa en la **Figura 1**. Estas actividades incrementan significativamente las concentraciones naturales de los metales en los ecosistemas, alterando el equilibrio ambiental y generando efectos negativos en la salud humana y en la biodiversidad [3].

En respuesta a esta problemática, se han establecido normas regulatorias para controlar la calidad del agua. En México, las normas NOM-127-SSA1-2021 y NOM-001-SEMARNAT-2021 establecen los límites permisibles de metales pesados en agua potable y en descargas hacia cuerpos receptores [4, 5]. Sin embargo, diferentes estudios han reportado que aproximadamente el 70% de los ríos en el país presentan algún grado de contaminación, reflejando la necesidad de fortalecer el monitoreo ambiental y desarrollar estrategias sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas [6].

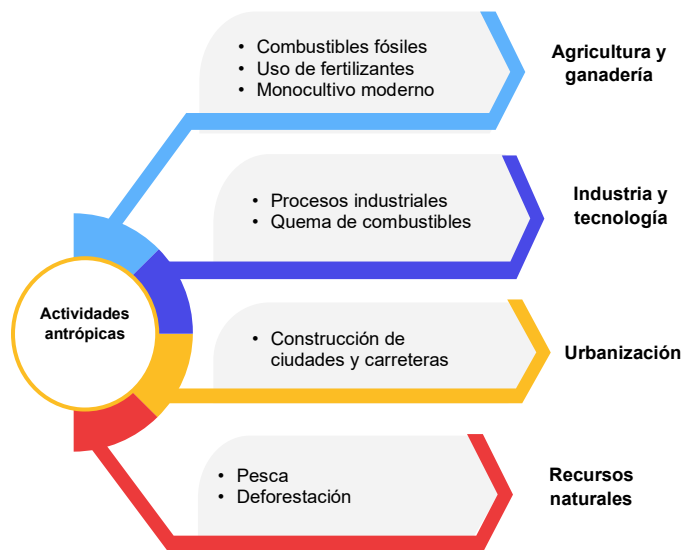


Figura 1 Actividades Antrópicas

El río Coatzacoalcos, ubicado en el sur del estado de Veracruz, es uno de los sistemas fluviales más importantes de México debido a su relevancia ambiental, económica e industrial. Este río, inicia su recorrido en la Sierra de Niltepec, Oaxaca, y abarca aproximadamente 21000 km² hasta desembocar en el Golfo de México. Desempeña un papel fundamental en el desarrollo industrial del país, ya que en sus inmediaciones se concentran industrias químicas y petroquímicas. Asimismo, constituye una vía estratégica para el transporte de mercancías y una fuente de recursos para actividades primarias como la pesca y agricultura. Sin embargo, el crecimiento industrial y urbano en la región ha provocado un deterioro progresivo en la calidad del agua [7,8].

Investigaciones realizadas en sedimentos, agua y fauna acuática han reportado la presencia de metales pesados en el río Coatzacoalcos; destacando Pb, Hg, Ni y Cr, los cuales representan un riesgo para los ecosistemas acuáticos y la población que depende de este recurso. Estudios han identificado concentraciones de Hg en poblaciones cercanas al río Coatzacoalcos, evidenciando procesos de bioacumulación asociados al consumo de peces contaminados [9]. Estos hallazgos resaltan la necesidad de fortalecer el monitoreo ambiental y desarrollar alternativas sostenibles para la remoción de metales pesados.

En los últimos años, la fitorremediación ha sido propuesta como una alternativa para el tratamiento de ecosistemas contaminados. Este proceso consiste en el uso de plantas o microorganismos capaces de absorber, acumular, transformar o estabilizar contaminantes mediante mecanismos fisiológicos y bioquímicos. En comparación con los métodos convencionales, presenta ventajas como menor costo, menor impacto ambiental y posibilidad de aplicación in situ [10]. Entre las especies con mayor potencial en sistemas acuáticos se encuentran las macrófitas flotantes, caracterizadas por poseer sistemas radiculares extensos que favorecen la absorción y retención de contaminantes.

E. crassipes, macrófita originaria de la cuenca del Amazonas, es considerada una de las plantas invasoras más agresivas a nivel mundial. Se caracteriza por su rápido crecimiento, elevada capacidad reproductiva y alta adaptabilidad a ambientes contaminados. Su pared celular está compuesta por biopolímeros como celulosa, hemicelulosa y lignina, cuyos grupos funcionales (hidroxilos, carboxilos y metoxilos) interactúan con iones metálicos mediante procesos de complejación e intercambio iónico, favoreciendo su acumulación en los tejidos vegetales [11-13].

Debido a estas características, *E. crassipes* ha sido utilizada como bioindicador de contaminación y como agente potencial en procesos de fitorremediación. Sin embargo, a pesar de su abundancia en diversos cuerpos de agua en México, incluido el río Coatzacoalcos, resulta necesario evaluar su capacidad de acumulación de metales pesados. Esto permitirá validar su uso como herramienta de monitoreo ambiental y explorar el aprovechamiento de su biomasa en aplicaciones tecnológicas y procesos químicos sostenibles. **Figura 2.**



Figura 2 a) Plantas de *Eichhornia crassipes* recolectadas. b) Biomasa seca obtenida.

En este contexto, en el presente estudio se evaluó la presencia de Ni, Cr, Pb, Hg y Cd en agua y en *E. crassipes* recolectada en el río Coatzacoalcos con el fin de determinar su potencial como fitorremediador in situ.

METODOLOGÍA

Muestra vegetal. La muestra de *E. crassipes* fue lavada con agua potable, para luego ser separada en raíces y parte aérea. Las fracciones obtenidas se sometieron a secado en un horno ECOSHEL, modelo 9053A a 60 °C durante 48 h para parte aérea y 60 h para las raíces. Una vez obtenida la

biomasa seca, esta fue triturada en una licuadora Taurus HALEY, hasta obtener partículas finas, las cuales fueron tamizadas mediante una malla de 30 mesh.

Digestión ácida (biomasa). Se colocó 1 g de biomasa seca en un vaso de precipitados de 250 mL y; bajo campana de extracción, se adicionaron 10 mL de ácido nítrico (HNO_3) al 64.9 %. La mezcla se dejó reposar durante 24 h. **Figura 3.**



Figura 3 Muestra vegetativa después de 24 h de reposo con NHO_3



Figura 3 Muestra vegetativa al finalizar la segunda etapa de digestión.

Posteriormente, se llevó la segunda etapa de digestión en una parrilla previamente calentada a 60 °C, donde se adicionaron 10 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 50 %, controlando la temperatura para evitar la ebullición. Transcurrida 1 h y reducido el volumen a aproximadamente 5 mL, se añadieron nuevamente 5 mL de H_2O_2 , repitiendo este procedimiento cada 30 minutos durante 2 h 30 min, hasta obtener una coloración clara con un volumen final de 5 mL.

Las muestras digeridas se retiraron de la parrilla con pinzas metálicas y se dejaron enfriar a temperatura ambiente bajo campana de extracción.

Filtrado y aforado (biomasa). La solución obtenida fue filtrada mediante papel Whatman de 125 mm utilizando una bomba de vacío. El filtrado se transfirió a un matraz volumétrico de 50 mL, y se aforó con agua destilada. Posteriormente, la solución se homogenizó y se almacenó en frascos ámbar a 4 °C.

Muestra de agua. La muestra de agua del río Coatzacoalcos fue recolectada conforme a la NMX-AA-14-1980 (Cuerpos receptores). Durante el muestreo, se determinaron in situ los parámetros de pH y temperatura. En el laboratorio, la muestra fue acidificada con HNO_3 al 64.9 % hasta alcanzar a un pH de 2 y finalmente se almacenó a 4 °C hasta su análisis.

Digestión ácida (agua). La digestión de la muestra agua se realizó conforme a lo establecido por Reyes Vásquez (2020). Se colocaron 10 mL de muestra en un vaso de precipitados de 250 mL y se

adicionaron 10 mL de H₂O₂ al 50 %. La mezcla se mantuvo en una parrilla a 60 °C durante 2 h, hasta reducir el volumen aproximadamente 5 mL. Posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente bajo campana de extracción.

Filtrado y aforado (agua). La muestra digerida se filtró con papel Whatman de 125 mm mediante bomba de vacío. El filtrado se transfirió a un matraz de 50 mL, se aforó con agua destilada y se homogenizó. Finalmente, la solución se almacenó en frascos ámbar a 4 °C. **Figura 4.**

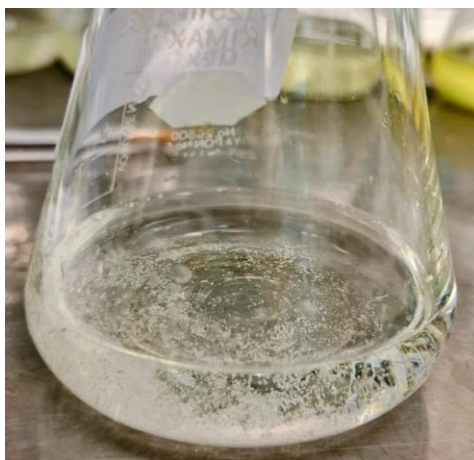


Figura 4 Muestra de agua al terminar de la digestión ácida.

Análisis ICP-MS. La determinación de las concentraciones de Cr, Ni, Cd, Pb y Hg, se realizó mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés) utilizando un equipo Agilent Technologies, Modelo 7800. Se realizaron tres repeticiones por muestra y 100 ciclos de lectura, con un tiempo de purga de 50 s seguido de 50 s de estabilización de plasma. Se emplearon tres puntos por masa en el patrón de pico, lo que permitió obtener resultados consistentes y reducir la variabilidad en las mediciones.

RESULTADOS

Agua. En la **Tabla 1**, se presentan las concentraciones de los metales Ni, Cr, Pb Hg y Cd determinados en la muestra de agua recolectada en el río Coatzacoalcos. Se observa que la concentración de Cd se encuentra por debajo del límite de detección del equipo ICP-MS, mientras que los metales con mayor concentración son Cr y Ni; en contraste Pb y Hg se encontraron en concentraciones menores.

Tabla 1 Concentración de metales pesados en muestra de agua del río Coatzacoalcos.

Metal	Concentración Promedio (mg L ⁻¹)
Ni	0.0378
Cr	0.0545
Pb	0.007
Hg	0.0075
Cd	<0.0005

Estos resultados confirman la presencia de trazas de metales pesados en el agua del río Coatzacoalcos, proporcionando un panorama general de la calidad del agua en el sitio evaluado.

En la **Figura 5** se presenta la comparación de las concentraciones de metales en muestras de agua del río Coatzacoalcos con los límites establecidos en las normas: NOM-001-SEMARNAT-2021, “Que establece los límites permisibles de contaminantes en las aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación”, y NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”. En la figura se observa que el Hg sobrepasa los límites establecidos en ambas normas, mientras que la concentración de Cr en agua únicamente excede los límites de la NOM-127-SSA1-2021.

La presencia de Hg y Cr en aguas del río Coatzacoalcos resulta preocupante, debido a que ambos metales son considerados agentes carcinógenos y genotóxicos, con capacidad de bioacumulación y biomagnificación en los tejidos que los absorben [2].

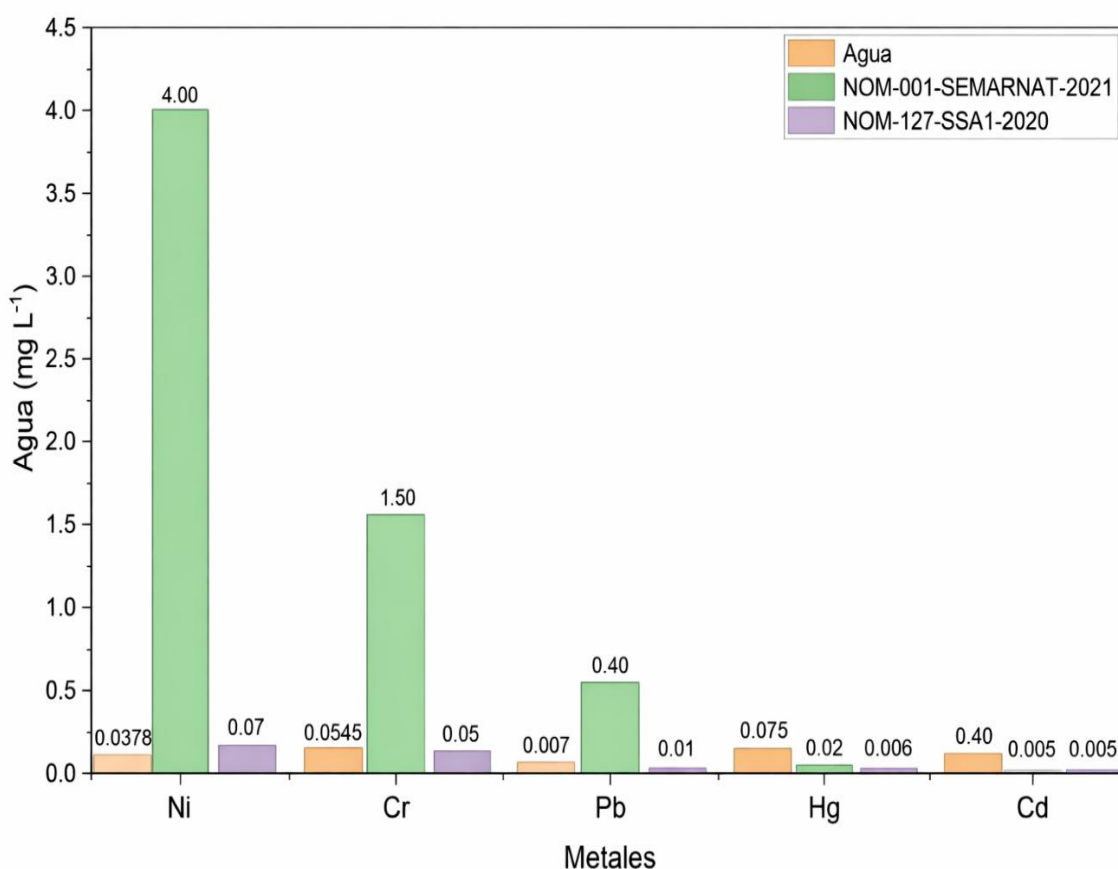


Figura 5 Comparación de metales pesados encontrados en aguas del río Coatzacoalcos y las NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-127-SSA1-2020.

***Eichhornia crassipes*.** En la **Figura 6**, se muestran las concentraciones promedio de los metales determinados en *E. crassipes*. Se observa que los metales con mayor concentración son Ni, Cr y Pb; mientras que Hg y el Cd se encuentran en menores concentraciones.

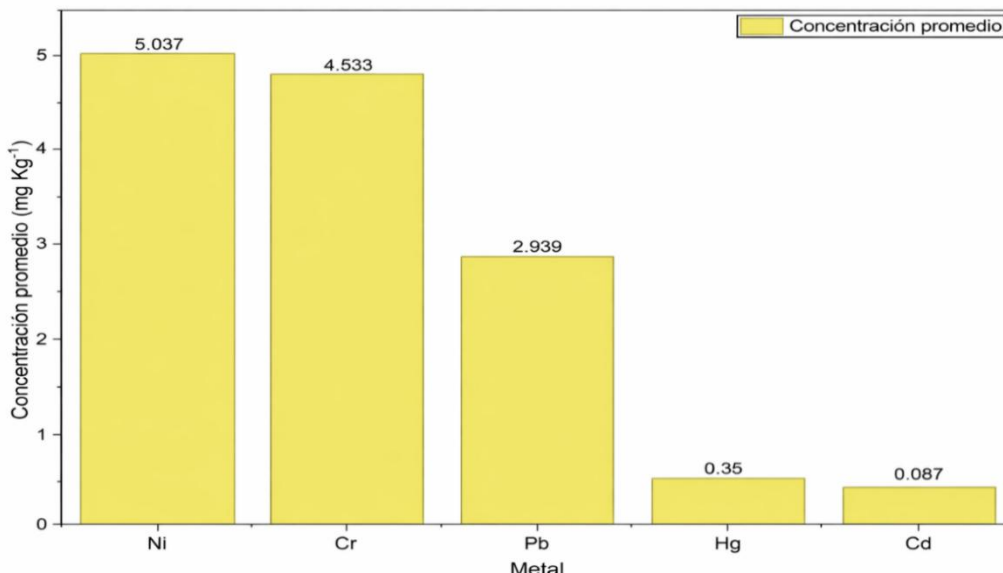


Figura 6 Concentraciones promedio de metales encontrados en el Jacint de agua recolectado en el río Coatzacoalcos.

La acumulación de metales pesados en *E. crassipes* se atribuye a la composición de la pared celular, constituida principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa. Estos biopolímeros aportan grupos funcionales como aminas, carboxilos, hidroxilos, sulfhídricos, carbonilos y fosfatos, los cuales favorecen la remoción de contaminantes disueltos en el agua mediante mecanismos como: complejación, coordinación, quelación, intercambio iónico y absorción [12, 14].

CONCLUSIONES

El presente estudio confirma la presencia de metales pesados en el río Coatzacoalcos, evidenciando una problemática ambiental relevante. Los resultados indican que las concentraciones de Hg y Cr superan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-2021 para agua de uso y consumo humano, y en el caso de Hg, también excede los límites de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descarga de aguas residuales. Esta situación representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos y para la población que depende de este recurso, debido al carácter carcinógeno, genotóxico y bioacumulable de dichos metales.

Asimismo, el análisis del *E. crassipes* demostró su capacidad para absorber y acumular metales pesados, destacando Ni, Cr y Pb. Esta capacidad de bioacumulación confirma su potencial como una herramienta de fitorremediación in situ, al actuar como un sistema biológico capaz de disminuir la concentración de contaminantes en el agua. Siendo los grupos funcionales que constituyen los

biopolímeros de su pared celular los que facilitan la remoción de los metales mediante diversos mecanismos fisicoquímicos.

Por último, los resultados obtenidos permiten diagnosticar el grado de contaminación por metales pesados en el sitio de estudio y evaluar el potencial fitorremediador del *Eichhornia crassipes*. Se concluye que esta macrófita, además de actuar como un bioindicador eficaz de contaminación en el río Coatzacoalcos, representa una alternativa viable y sostenible para el desarrollo de estrategias de remediación ambiental. Se recomienda fortalecer el monitoreo continuo del río Coatzacoalcos y explorar el aprovechamiento de la biomasa residual posterior a la fitorremediación, con el fin de evitar la reincorporación de los metales al ambiente.

REFERENCIAS

- [1] Covarrubias, S. A., & Peña-Cabriaes, J. J. (2017). *Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 33(1), 7–21.
- [2] Cruz-Santiago, O., Torres-Dosal, A., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Espinosa-Reyes, G., González-Mille, D. J., & Malafaia, G. (2024). *Regiones de emergencia sanitaria y ambiental en México: Una breve revisión sobre la cuenca baja del río Coatzacoalcos*. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 93, 10.
- [3] De Alba, F., & Martín Cerón, J. (2019). *En contexto: Los ríos revueltos, radiografía de la contaminación*. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública (CESOP), 3–26.
- [4] Gebrehiwot, H., Dekebo, A., & Endale, M. (2022). *Chemical Composition, Pharmacological Activities, and Biofuel Production of Eichhornia crassipes (Water Hyacinth): A Review*. Journal of the Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry, 9(3), 849–866.
- [5] Lima, H. D. P., & Asencios, Y. J. (2021). *Eichhornia crassipes (Mart.) Solms (natural or carbonized) as biosorbent to remove pollutants in water*. SN Applied Sciences, 3(8), 750.
- [6] Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Emran, T. Bin, Nainu, F., Khusro, A., Idris, A. M., Khandaker, M. U., Osman, H., Alhumaydhi, F. A., & Simal-Gandara, J. (2022). *Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity*. Journal of King Saud University - Science, 34(3), 101865.
- [7] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). *Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Alto Río Coatzacoalcos, Bajo Río Coatzacoalcos, Alto Río Uxpanapa, Bajo Río Uxpanapa, Río Huazuntlán y Llanuras de Coatzacoalcos, pertenecientes a la Subregión Hidrológica Coatzacoalcos de la Región Hidrológica número 29 Coatzacoalcos*. Diario Oficial de la Federación (DOF). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5485833

- [8] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022). *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación (NOM-001-SEMARNAT-2021)*. Diario Oficial de la Federación (DOF). <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-001-semarnat-2021/>
- [9] Secretaría de Salud. (2022). *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua (NOM-127-SSA1-2021)*. Diario Oficial de la Federación (DOF). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5650705
- [10] Sharma, A., & Aggarwal, N. K. (2020). *Water Hyacinth: A Potential Lignocellulosic Biomass for Bioethanol*. Springer International Publishing, Cham.
- [11] Tejada-Tovar, C., Paz-Astudillo, I., Villabona-Ortíz, A., Espinosa-Fortich, M., & López-Badel, C. (2018). *Aprovechamiento del Jacinto de Agua (Eichhornia crassipes) para la síntesis de carboximetilcelulosa*. Revista Cubana de Química, 30(2), 211–221.
- [12] Trasande, L., DiGangi, J., Evers, D. C., Petrlik, J., Buck, D. G., Šamánek, J., Beeler, B., Turnquist, M. A., & Regan, K. (2016). *Economic implications of mercury exposure in the context of the global mercury treaty: Hair mercury levels and estimated lost economic productivity in selected developing countries*. Journal of Environmental Management, 183, 229–235.
- [13] Xu, W., Jin, Y., & Zeng, G. (2024). *Introduction of heavy metals contamination in the water and soil: a review on source, toxicity and remediation methods*. Green Chemistry Letters and Reviews, 17(1), 1–25.
- [14] Zaynab, M., Al-yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M., Ali, K., & Li, S. (2022). *Health and environmental effects of heavy metals*. Journal of King Saud University - Science, 34(1), 101653.

Restricciones de sostenibilidad y riesgo de cola en portafolios accionarios de México**Sustainability constraints and tail risk in mexican equity portfolios**Villada-Medina H.D.^{1*}, Rendón-García J.F.¹, Alcalá G.²¹ Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 No. 76A-354, Vía al Volador, Medellín,
Antioquia, Colombia.² Universidad Veracruzana, Lomas del Estadio S/N, Col. Zona Universitaria, C.P. 91090,
Xalapa, Veracruz, México.

*hernanvillada@itm.edu.co

Artículo Científico**Publicado: 31 de agosto 2026****RESUMEN**

Este trabajo evalúa cómo las restricciones de sostenibilidad impuestas por separado sobre los puntajes ambientales (E), sociales (S), de gobernanza (G) y el agregado ambiental, social y de gobernanza (ESG) modifican la frontera eficiente y el riesgo de cola de portafolios accionarios mexicanos. Se utilizó un panel mensual de emisoras mexicanas de Bloomberg para el periodo 2012-2024 y se construyeron portafolios con restricciones de peso homogéneas. Como referencia, se tomó el portafolio de mínima varianza sin restricción de *score* y las metas sostenibles se fijaron como fracciones exactas del margen factible de mejora del puntaje respecto de esa referencia. La evidencia combinó ejercicios dentro de la muestra para 2017-2024 y validación fuera de la muestra, con diagnóstico de riesgo de cola mediante Value-at-Risk (VaR) y pérdida esperada (ES) bajo aproximaciones Normal y Gram-Charlier, contrastadas con medidas empíricas y pruebas de Kupiec y Christoffersen. Los resultados mostraron que el efecto de las restricciones no fue uniforme entre pilares: dentro de muestra, gobernanza presentó el menor deterioro de la relación riesgo-rendimiento y la menor sensibilidad de VaR y ES al endurecimiento de la meta; ambiental y ESG agregado mostraron el mayor incremento del riesgo de cola en metas exigentes; y fuera de muestra solo algunas metas moderadas preservaron o redujeron marginalmente el ES empírico, mientras las metas estrictas lo empeoraron. Se concluyó que el diseño de portafolios sostenibles en México debe evaluarse por pilar específico y con métricas conjuntas de eficiencia y cola.

Palabras clave: Finanzas sostenibles; México; riesgo de cola; portafolios sostenibles; criterios ASG.

ABSTRACT

This paper evaluates how sustainability constraints imposed separately on Environmental (E), Social (S), Governance (G), and the aggregate Environmental, Social, and Governance (ESG) scores alter the efficient frontier and the tail risk profile of Mexican equity portfolios. A Bloomberg-based monthly panel of Mexican equities for 2012-2024 was used to construct portfolios under homogeneous weight constraints. The unconstrained minimum-variance portfolio was taken as the internal reference, and sustainability targets were defined as exact fractions of the

feasible score-improvement margin relative to that reference. The evidence combined in-sample exercises for 2017-2024 and rolling out-of-sample validation, with extreme-risk diagnostics based on Value-at-Risk (VaR) and Expected Shortfall (ES) under Normal and Gram-Charlier approximations, contrasted with empirical measures and Kupiec-Christoffersen tests. The results showed that the effect of the constraints was not uniform across pillars: in-sample, Governance produced the smallest deterioration in the risk-return trade-off and the flattest VaR and ES response as targets tightened; Environmental and aggregate ESG displayed the largest increase in tail risk under demanding targets; and out-of-sample only some moderate targets preserved or marginally reduced empirical ES, whereas strict targets worsened it. It was concluded that sustainable portfolio design in Mexico should be assessed by specific pillar and with joint efficiency and tail risk metrics. **Keywords:** Sustainable finance; Mexico; tail risk; sustainable portfolios; ESG criteria.

INTRODUCCIÓN

La teoría moderna de portafolios parte del problema media-varianza de Markowitz: para un conjunto dado de activos y restricciones, los inversionistas buscan combinaciones que maximicen el rendimiento esperado para un nivel de riesgo o, de manera equivalente, que minimicen el riesgo para un rendimiento objetivo. La frontera eficiente resume el mejor conjunto de oportunidades disponible bajo esa arquitectura. Cuando se impone una restricción adicional, el conjunto factible se reduce y la frontera tiende a desplazarse hacia adentro. En consecuencia, exigir mejoras en un *score* de sostenibilidad puede deteriorar la relación riesgo-rendimiento incluso si el objetivo sostenible resulta deseable en sí mismo.

Ese costo potencial, sin embargo, no agota la evaluación económica del problema. Una restricción de sostenibilidad puede reducir la eficiencia media-varianza y, al mismo tiempo, modificar favorablemente la cola izquierda de la distribución de rendimientos. Por ello, la pregunta relevante no es solo cuánto se desplaza la frontera eficiente cuando se impone una meta de *score*, sino si parte de esa pérdida se compensa con un menor riesgo de cola, medido aquí mediante *Value-at-Risk* (VaR) y pérdida esperada (ES).

En este estudio, la referencia no es un índice de mercado ni un umbral absoluto de sostenibilidad. Se toma como *benchmark* interno el portafolio de mínima varianza sin restricción de *score*, construido con el mismo universo filtrado y las mismas restricciones de peso. El *score* de ese portafolio funciona como punto de partida para elevar, por separado, los puntajes ambiental (E), social (S), de gobernanza (G) y ESG agregado. Los objetivos T25, T50 y T75 se definen como fracciones exactas del margen factible de mejora del *score* respecto de esa referencia, lo que permite comparar restricciones homogéneas entre dimensiones.

La literatura relevante converge en dos frentes. El primero examina qué ocurre con el problema de portafolios cuando, además de la relación media-varianza, se incorporan objetivos de sostenibilidad. Pedersen et al. [1] formalizan esta intuición mediante una ESG-efficient frontier, mientras que Xidonas y Essner [2] muestran que la construcción de portafolios ESG es un problema naturalmente multiobjetivo, en el que rendimiento, riesgo y sostenibilidad deben balancearse de manera conjunta.

En un plano más general, Amel-Zadeh y Serafeim [3] documentan que los inversionistas utilizan información ESG por su relevancia para desempeño y riesgo, aunque enfrentan problemas persistentes de comparabilidad y confiabilidad, y Gillan et al. [4] subrayan que sus implicaciones económicas no se reducen a una prima única de sostenibilidad.

El segundo frente pregunta si ESG importa para el riesgo a la baja y, en particular, para la cola de pérdidas. Bax et al. [5] muestran que los *scores* ESG contienen información sobre dependencia y dependencia de cola, incluso al distinguir los pilares E, S y G. Hoepner et al. [6] encuentran que el *engagement* en temas ESG puede reducir el *downside risk*, mientras que la evidencia en episodios de estrés es mixta: Albuquerque et al. [7] y Broadstock et al. [8] documentan resiliencia relativa en determinados contextos, pero Lashkaripour [9] y Lööf et al. [10] muestran que mejores calificaciones ESG no garantizan una reducción general del *tail risk* y pueden acompañarse de menor *upside potential*. En la misma línea, Zhang et al. [11] relacionan las calificaciones ESG con medidas implícitas de riesgo de cola.

Sobre esa base, la brecha de investigación es concreta. La literatura rara vez compara, dentro del mismo país-año, con el mismo universo filtrado y las mismas restricciones de peso, qué ocurre cuando la restricción se impone por separado sobre E, S, G y ESG agregado.

Tampoco suele contrastar, dentro de una misma arquitectura de portafolio, el costo media-varianza de elevar el *score* con el comportamiento de VaR y ES dentro y fuera de muestra. Por ello, el objetivo del estudio es evaluar si restricciones de sostenibilidad centradas en el portafolio de mínima varianza generan efectos diferenciados sobre la frontera eficiente y el riesgo de cola de portafolios accionarios mexicanos.

METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque metodológico cuantitativo y de carácter empírico, apoyado en un diseño longitudinal de panel. El marco analítico se fundamenta de manera dual: por un lado, utiliza la teoría de optimización media-varianza para la construcción estructurada de los portafolios; por el otro, emplea técnicas de medición de riesgo de cola asimétrico para evaluar los efectos económicos de la imposición de restricciones de sostenibilidad.

Datos. La evidencia empírica se construyó a partir de datos tomados de Bloomberg de emisoras listadas en México y se implementó por separado para las dimensiones ambiental (E), social (S), de gobernanza (G) y ESG agregado. La ventana de rendimientos comprendió de enero de 2012 a diciembre de 2024 y los años de formación de portafolio abarcan de 2017 a 2024. Los rendimientos se trabajaron con frecuencia mensual y los *scores* se rezagaron para que la formación del portafolio en el año t utilizara exclusivamente información disponible al cierre de $t-1$. El universo invertible se depuró en tres etapas: i) se excluyeron índices y se conservó una sola clase de acción por emisor; ii) se eliminaron emisoras con rendimientos simples mensuales extremos superiores a 300 % o inferiores a -80 %; y iii) un ticker-año solo era elegible si contaba con al menos 36 observaciones en la ventana de estimación, 12 de 12 meses observables en el año de evaluación y *score* disponible para la dimensión correspondiente.

La **Figura 1** resume el contexto de mercado de la muestra. El S&P/BMV IPC presentó una tendencia creciente de largo plazo entre 2012 y 2024, interrumpida por correcciones periódicas y, en particular, por la caída abrupta asociada al choque del COVID-19 en 2020, seguida de una recuperación que llevó al índice a nuevos máximos en 2023-2024. A su vez, la volatilidad móvil de 12 meses fue relativamente baja al inicio del período, aumentó desde 2018 y alcanzó sus niveles más altos durante y después del episodio pandémico, lo que justificó complementar el análisis media-varianza con métricas de riesgo de cola.



Figura 1. Contexto del mercado accionario mexicano (2012-2024). El panel superior muestra el nivel del S&P/BMV IPC en puntos y el inferior la volatilidad móvil de 12 meses de los rendimientos mensuales.

Después de la depuración estructural, la muestra conservó 35 emisoras únicas en el periodo 2017-2024. No obstante, la elegibilidad anual fue menor al inicio de la ventana: 27 firmas entre 2017 y 2020, 29 en 2021 y 35 entre 2022 y 2024; esta trayectoria fue idéntica en las corridas de E, S, G y ESG. En promedio, la ventana de estimación aportó 53.7 observaciones mensuales en 2017 y alcanzó 60.0 observaciones en 2023-2024, mientras que la ventana de evaluación cumple 12 meses completos desde 2018.

La **Tabla 1** resume la distribución agregada de los *scores* en la muestra filtrada. La heterogeneidad entre dimensiones fue marcada: gobernanza exhibió la media más alta (3.774) y la menor dispersión, medida por la desviación estándar (DE = 0.786), mientras que los *scores* ambiental y social presentaron medias más bajas (2.648 y 2.775) y dispersión considerablemente mayor (DE = 2.145 y 1.987). El *score* ESG agregado ocupó una posición intermedia, con media de 2.945 y DE = 1.343. Estos descriptivos fueron sustantivos para la identificación, porque la dispersión específica de cada *score* condicionó el costo económico de imponer metas centradas en el *benchmark* interno.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos agregados de los *scores* E, S, G y ESG en la muestra filtrada, 2017-2024.

Dimensión	N firmas únicas	N firma-año	Media	DE	Mín.	P25	Mediana	P75	Máx.
E	35	242	2.648	2.145	0.000	0.610	2.445	4.013	8.070
S	35	242	2.775	1.987	0.000	1.170	2.525	3.960	8.220
G	35	242	3.774	0.786	1.710	3.283	3.730	4.410	5.590
ESG	35	242	2.945	1.343	0.420	1.802	3.035	3.950	6.100

Nota: “N firmas únicas” corresponde al número de emisoras distintas observadas al menos una vez en la muestra filtrada entre 2017 y 2024; “N firma-año” corresponde al total de observaciones elegibles firma-año agregadas del periodo.

Construcción de portafolios. Sea $w_t \in \mathbb{R}^{N_t}$ el vector de pesos del año t , Σ_t la matriz de covarianzas estimada con la ventana de entrenamiento y $q_{s,t}$ el vector de puntajes de sostenibilidad en la dimensión $s \in \{E, S, G, ESG\}$. El *benchmark* interno BM se define como el portafolio de mínima varianza:

$$w_t^{BM} = \arg \min_{w_t} w_t' \Sigma_t w_t \quad (1)$$

sujeto a:

$$\begin{aligned} 1' w_t &= 1, 0 \leq w_{i,t} \leq \bar{w}, \\ i &= 1, \dots, N_t. \end{aligned} \quad (2)$$

La restricción $0 \leq w_{i,t} \leq \bar{w}$ implica ausencia de ventas en corto y cotas homogéneas de participación por activo.

El *score* del benchmark en la dimensión s se define como:

$$S_{BM,s,t} = q'_{s,t} w_t^{BM}. \quad (3)$$

Bajo el mismo conjunto factible, el puntaje máximo alcanzable en cada dimensión se obtiene de

$$S_{max,s,t} = \max_{w_t} q'_{s,t} w_t \text{ sujeto a (2)}. \quad (4)$$

A partir de esta referencia, la meta comparable para cada dimensión y nivel de exigencia se define como:

$$S^{*(s,\lambda)} = S(BM, s) + \lambda(S_{max,s} - S_{BM,s}), \\ \lambda \in \{0.25, 0.50, 0.75\} \quad (5)$$

Para cada combinación (s, λ) , el portafolio restringido se obtiene resolviendo nuevamente el problema de mínima varianza:

$$w_{s,\lambda,t}^* = \arg \min_{w_t} w_t' \Sigma_t w_t \quad (6)$$

sujeto a:

$$1'w_t = 1, 0 \leq w_{i,t} \leq \bar{w}, q'_{s,t} w_t = S_{s,\lambda,t}^*. \quad (7)$$

Esta parametrización expresa la severidad de la restricción como una fracción exacta del margen factible de mejora del *score* y permite comparaciones homogéneas entre dimensiones.

Evaluación fuera de muestra y medición del riesgo de cola. La evaluación fuera de muestra sigue un esquema de ventana móvil. En cada fecha de rebalanceo, los parámetros se estiman con la ventana histórica de entrenamiento y los pesos resultantes se aplican al siguiente período de evaluación. El retorno realizado del portafolio se define como:

$$r_{p,t+1} = (w_{s,\lambda,t}^*)' r_{t+1}, \quad (8)$$

y la pérdida correspondiente como:

$$L_{p,t+1} = -r_{p,t+1}. \quad (9)$$

El desempeño fuera de muestra se resume mediante el retorno medio y volatilidad realizados. El riesgo de cola se evalúa con VaR y ES bajo dos especificaciones paramétricas: Normal, como referencia base, y Gram–Charlier, para permitir asimetría y exceso de curtosis en la distribución de pérdidas. Fuera de muestra, la calibración del VaR se examina mediante el indicador de excedencia:

$$I_{t+1} = 1\{L_{p,t+1} > VaR_{\alpha,t+1}\}, \quad (10)$$

mientras que la severidad observada de las pérdidas extremas se resume con el ES empírico:

$$ES_{\alpha}^{emp} = \frac{\sum_{t=1}^T L_{p,t} I_t}{\sum_{t=1}^T I_t}. \quad (11)$$

Lógica de identificación. La identificación es relativa al *benchmark BM* y específica por dimensión de *score*.

Para cada año, todos los portafolios se construyen sobre el mismo universo filtrado de activos, con la misma ventana de estimación y las mismas restricciones de peso. En consecuencia, la diferencia entre un portafolio restringido y *BM* puede atribuirse a la meta de sostenibilidad impuesta y no a cambios en la muestra, en el horizonte temporal o en la regla de construcción. Cuando una meta no es factible bajo el conjunto de restricciones vigente, dicha observación se registra como infactible y se excluye de la comparación correspondiente.

RESULTADOS

Desplazamiento de la frontera eficiente y riesgo de cola dentro de muestra. Los ejercicios dentro de muestra se calcularon para los años 2017-2024; para mantener la exposición compacta, el texto principal ilustra con detalle 2024, el último año de formación del portafolio. **La Figura 2** muestra que imponer metas sobre E, S, G y ESG desplazó la frontera eficiente respecto de *BM*, pero no con la misma intensidad. La contracción es relativamente contenida en gobernanza, mientras que ambiental y ESG agregado desplazaron el tramo eficiente hacia regiones de mayor riesgo cuando la meta se endureció.

La **Tabla 2** cuantifica ese patrón y muestra que la heterogeneidad se extiende al riesgo de cola. En gobernanza, el endurecimiento de la restricción desde *BM* hasta T75 elevó el retorno esperado de 0.91 % a 1.23 %, con un aumento de riesgo de 3.46 % a 4.24 %, mientras que el VaR y el ES de Gram-Charlier pasaron de 4.61 % y 5.65 % a 5.19 % y 6.37 %. En ambiental, el desplazamiento es mucho más costoso: T75 llevó el riesgo a 5.20 % y el ES a 11.09 %. Social ocupó una posición intermedia, y ESG agregado reprodujo una pendiente de cola cercana a ambiental en metas altas. La **Figura 3** refuerza esta lectura al mostrar la trayectoria completa de dosis-respuesta: gobernanza presenta la pendiente más plana de VaR y ES a medida que creció la proporción de mejora factible del *score*, mientras que ambiental y ESG aceleraron con mayor rapidez cuando la meta superó niveles moderados.

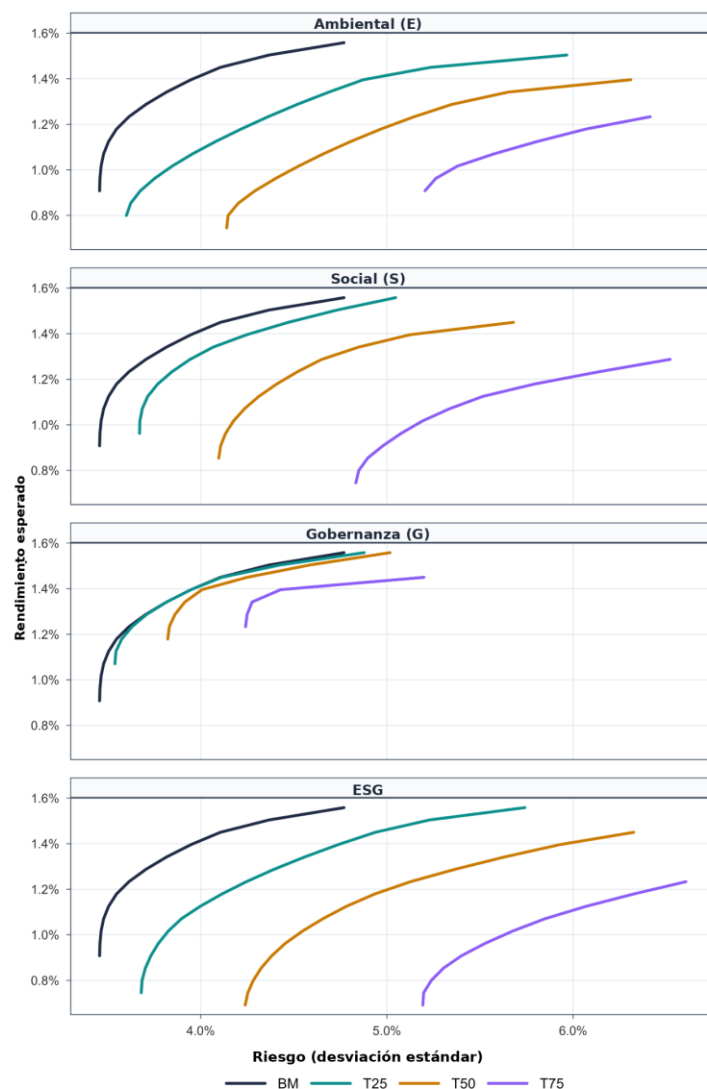


Figura 2. Frontera eficiente media-desviación estándar dentro de muestra para México, reportada por separado para restricciones sobre los *scores* E, S, G y ESG. Se muestra únicamente el tramo eficiente.

Tabla 2. Resumen dentro de muestra para 2024 del portafolio de mínima varianza (BM) y de los objetivos centrados en BM en México.

Pilar	Portafolio	Retorno esperado	Riesgo (DE)	VaR GC (5%)	ES GC (5%)	Score objetivo
E	BM	0.91%	3.46%	4.61%	5.65%	
E	T25	0.80%	3.60%	4.81%	5.79%	3.860
E	T50	0.75%	4.14%	5.64%	7.21%	4.742
E	T75	0.91%	5.20%	7.60%	11.09%	5.624
S	BM	0.91%	3.46%	4.61%	5.65%	

Pilar	Portafolio	Retorno esperado	Riesgo (DE)	VaR GC (5%)	ES GC (5%)	Score objetivo
S	T25	0.96%	3.67%	4.89%	6.05%	3.781
S	T50	0.85%	4.10%	5.77%	7.21%	4.758
S	T75	0.75%	4.83%	7.19%	9.21%	5.734
G	BM	0.91%	3.46%	4.61%	5.65%	
G	T25	1.07%	3.54%	4.54%	5.60%	4.210
G	T50	1.18%	3.82%	4.72%	5.82%	4.439
G	T75	1.23%	4.24%	5.19%	6.37%	4.668
ESG	BM	0.91%	3.46%	4.61%	5.65%	
ESG	T25	0.75%	3.68%	5.11%	6.20%	3.675
ESG	T50	0.69%	4.24%	6.19%	7.56%	4.208
ESG	T75	0.69%	5.19%	8.08%	10.43%	4.741

Nota: BM corresponde al portafolio de mínima varianza sin restricción de score; por ello sus valores se repiten en las cuatro dimensiones.

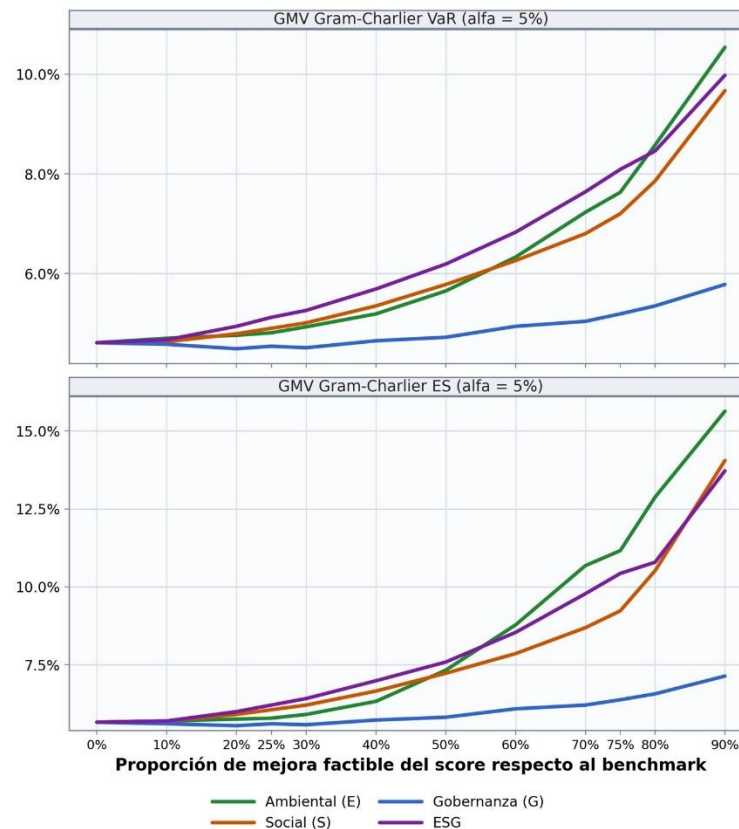


Figura 3. Relación dosis-respuesta entre la proporción de mejora factible del score respecto del benchmark y el VaR y ES de Gram-Charlier del portafolio de mínima varianza en México con $\alpha = 5\%$.

Rendimiento realizado y riesgo de cola fuera de muestra. La **Tabla 3** resume la evidencia fuera de muestra con las métricas estrictamente necesarias para la pregunta del artículo: retorno medio realizado, desviación estándar realizada, frecuencia observada de violaciones del VaR de Gram-Charlier al 5 % y ES empírico. El patrón principal no fue una mejora general del riesgo de cola, sino una respuesta dependiente del pilar y de la intensidad de la meta. Gobernanza ofreció el balance más favorable: T25 y T50 elevaron el retorno medio a 0.22 % y 0.28 %, con riesgo de 4.12 % y 4.27 %, y mantuvieron el ES empírico prácticamente estable en 8.60 %.

En ambiental, T25 redujo marginalmente el ES empírico a 8.42 %, pero T50 y T75 lo elevaron a 9.46 % y 12.05 %. En social, la mejora no apareció ni en retorno ni en cola, y T75 empeoró tanto el rendimiento como el ES empírico. ESG agregado mostró un comportamiento intermedio: T25 y T50 preservaron parcialmente la cola, pero T75 aumentó el ES empírico a 11.57 %. La información de VaR fuera de muestra debe interpretarse como evidencia de calibración y no como una medida directa de pérdidas realizadas.

Las tasas de violación disminuyen en varias combinaciones cuando la restricción se endurece, pero el anexo muestra que el VaR de Gram-Charlier sigue subestimando la cola en muchas de ellas. Por eso, la lectura financiera principal descansa en el ES empírico: solo algunas metas moderadas preservaron o redujeron ligeramente la severidad de las pérdidas extremas, mientras que las metas estrictas tendieron a empeorar la cola en las cuatro dimensiones.

Tabla 3. Evidencia fuera de muestra para México: retorno realizado, riesgo y cola observada por dimensión de score y objetivo centrado en BM.

Pilar	Portafolio	Retorno medio	Riesgo (DE)	Violaciones VaR GC (5%)	ES empírico	Δ ES empírico vs BM
E	BM	0.11%	4.16%	14.6%	8.66%	0.00%
E	T25	0.14%	4.23%	12.5%	8.42%	-0.24%
E	T50	0.23%	4.33%	7.3%	9.46%	0.80%
E	T75	0.31%	5.04%	7.3%	12.05%	3.39%
S	BM	0.11%	4.16%	14.6%	8.66%	0.00%
S	T25	0.08%	4.21%	12.5%	8.28%	-0.38%
S	T50	0.06%	4.29%	8.3%	8.65%	-0.01%
S	T75	-0.10%	5.00%	10.4%	11.22%	2.56%
G	BM	0.11%	4.16%	14.6%	8.66%	0.00%
G	T25	0.22%	4.12%	11.5%	8.60%	-0.06%
G	T50	0.28%	4.27%	11.5%	8.60%	-0.06%

Pilar	Portafolio	Retorno medio	Riesgo (DE)	Violaciones VaR GC (5%)	ES empírico	Δ ES empírico vs BM
G	T75	0.28%	4.59%	7.3%	9.18%	0.52%
ESG	BM	0.11%	4.16%	14.6%	8.66%	0.00%
ESG	T25	0.10%	4.17%	12.5%	8.17%	-0.49%
ESG	T50	0.13%	4.33%	9.4%	8.55%	-0.11%
ESG	T75	0.05%	5.12%	7.3%	11.57%	2.91%

Nota: La tasa de violaciones corresponde a excedencias observadas del VaR de Gram-Charlier con $\alpha = 5\%$ evaluado fuera de muestra y se reporta como indicador de calibración; el ES empírico resume la severidad observada de las pérdidas extremas. BM se repite porque el portafolio de referencia es común a los cuatro casos.

DISCUSIÓN

Los resultados son consistentes con la lógica del modelo media-varianza y con la literatura sobre fronteras eficientes con restricciones ESG: al imponer una restricción adicional de *score*, el conjunto

factible se reduce y la frontera eficiente se desplaza hacia adentro [1,2]. Sin embargo, el desplazamiento no fue uniforme entre pilares. En México, la restricción sobre gobernanza generó el menor deterioro conjunto de retorno esperado, desviación estándar, VaR y ES dentro de muestra, mientras que las restricciones sobre ambiental y, en metas altas, sobre ESG agregado implicaron el mayor costo en eficiencia y en riesgo de cola. Esta evidencia refuerza la idea de que el *score* compuesto no resume adecuadamente la heterogeneidad económica entre pilares.

Desde la perspectiva del riesgo de cola, los hallazgos dialogan mejor con la literatura que reporta resultados mixtos que con la idea de una reducción universal del downside risk asociada con ESG. Bax et al. [5] muestran que los *scores* ESG contienen información sobre dependencia de cola, Hoepner et al. [6] encuentran que el *engagement* ESG puede reducir el downside risk, pero Lashkaripour [9], Löff et al. [10] y Zhang et al. [11] documentan que la relación entre ESG y riesgo de cola depende de la métrica, del episodio de mercado y de la dimensión considerada.

Los resultados del presente estudio se alinean con esa evidencia mixta: dentro de muestra, gobernanza preserva mejor VaR y ES en metas moderadas, mientras que ambiental, social y ESG incrementan el costo de cola cuando la restricción se endurece; fuera de muestra, solo algunas metas moderadas preservan o reducen marginalmente el ES empírico, mientras que las metas estrictas deterioran las pérdidas extremas en las cuatro dimensiones.

En términos aplicados, el hallazgo relevante no es que "más sostenibilidad" mejore o empeore en general el riesgo de cola, sino que el efecto depende del pilar restringido y de la intensidad de la meta.

Para gestores de portafolio, comités de inversión e inversionistas institucionales con mandatos sostenibles en México, esto implica que las metas sobre gobernanza parecen ser las más compatibles con la preservación relativa del perfil de cola, mientras que metas agresivas sobre ambiental o sobre el *score* ESG agregado exigen una mayor tolerancia a pérdidas extremas. En consecuencia, la evaluación de estrategias sostenibles debe combinar métricas media-varianza y medidas de cola, en lugar de descansar exclusivamente en un *score* compuesto.

CONCLUSIONES

Este trabajo se ocupa de evaluar cómo restricciones de sostenibilidad impuestas por separado sobre los puntajes ambiental (E), social (S), de gobernanza (G) y ESG agregado modifican la frontera eficiente y el riesgo de cola de portafolios accionarios mexicanos. Mediante una arquitectura centrada en el portafolio de mínima varianza sin restricción de *score*, y con metas definidas como fracciones exactas del margen factible de mejora, se encontró que el efecto de las restricciones no es uniforme entre dimensiones.

Dentro de muestra, la restricción sobre gobernanza fue la que menos deterioró la relación riesgo-rendimiento y la que mostró la menor sensibilidad de VaR y ES al endurecimiento de la meta; en cambio, las restricciones sobre ambiental y sobre el *score* ESG agregado incrementaron con mayor rapidez el riesgo de cola en metas exigentes. Fuera de muestra, no se encontró una reducción general del riesgo de cola: algunas metas moderadas preservaron o redujeron ligeramente el ES empírico, pero las metas estrictas empeoraron la severidad de las pérdidas extremas en las cuatro dimensiones.

En términos prácticos, los resultados son útiles para gestores de portafolio, comités de riesgo e inversionistas institucionales que incorporan criterios sostenibles en México, porque muestran que una misma mejora relativa del *score* no implica el mismo costo económico ni el mismo efecto sobre la cola de pérdidas.

El estudio tiene limitaciones que abren importantes líneas de investigación. En primer lugar, los resultados dependen de un solo mercado, un único proveedor de scores y una arquitectura específica de filtrado. Además, el modelo asume fricción cero, por lo que estudios posteriores deben incorporar costos de transacción, de impacto en el mercado y de rebalanceo para evaluar la viabilidad operativa de las metas más agresivas. Metodológicamente, el análisis se apoya en un enfoque estático de optimización media-varianza y expansiones paramétricas (Gram-Charlier); trabajos futuros podrían superar estas limitaciones empleando optimización dinámica de portafolios (por ejemplo, matrices de covarianza condicionales tipo GARCH o enfoques de Black-Litterman con perspectivas ESG). Asimismo, para capturar con mayor precisión las no linealidades extremas del mercado, resultaría valioso evaluar el fenómeno mediante la Teoría de Valores Extremos (EVT) o modelos de Cópulas para analizar la dependencia de cola asimétrica entre los activos sostenibles.

ANEXO

Se presentan las tablas necesarias para documentar la calibración ex post del riesgo de cola sin sobrecargar el texto principal. La **Tabla A1** reporta el *backtesting* formal del VaR al 5 % y la **Tabla A2** resume las brechas entre el ES empírico y las aproximaciones paramétricas.

Tabla A1. Resumen de backtesting de VaR en México con $\alpha = 5\%$, incluyendo las especificaciones Normal y Gram-Charlier.

Pilar	Portafolio	Modelo	Tasa de violaciones	p-valor UC	p-valor IND	p-valor CC	Diagnóstico
E	BM	Gram-Charlier	14.6%	0.000	0.959	0.002	subestimado
E	BM	Normal	14.6%	0.000	0.959	0.002	subestimado
E	T25	Gram-Charlier	12.5%	0.004	0.664	0.015	subestimado
E	T25	Normal	12.5%	0.004	0.206	0.008	subestimado
E	T50	Gram-Charlier	7.3%	0.333	0.073	0.125	no rechazado
E	T50	Normal	9.4%	0.078	0.225	0.101	no rechazado
E	T75	Gram-Charlier	7.3%	0.333	0.073	0.125	no rechazado
E	T75	Normal	7.3%	0.333	0.073	0.125	no rechazado
S	BM	Gram-Charlier	14.6%	0.000	0.959	0.002	subestimado
S	BM	Normal	14.6%	0.000	0.959	0.002	subestimado
S	T25	Gram-Charlier	12.5%	0.004	0.664	0.015	subestimado
S	T25	Normal	13.5%	0.001	0.320	0.004	subestimado
S	T50	Gram-Charlier	8.3%	0.170	0.682	0.358	no rechazado
S	T50	Normal	10.4%	0.032	0.345	0.065	subestimado
S	T75	Gram-Charlier	10.4%	0.032	0.345	0.065	subestimado

Pilar	Portafolio	Modelo	Tasa de violaciones	p-valor UC	p-valor IND	p-valor CC	Diagnóstico
S	T75	Normal	11.5%	0.012	0.493	0.034	subestimado
G	BM	Gram-Charlier	14.6%	0.000	0.959	0.002	subestimado
G	BM	Normal	14.6%	0.000	0.959	0.002	subestimado
G	T25	Gram-Charlier	11.5%	0.012	0.493	0.034	subestimado
G	T25	Normal	12.5%	0.004	0.206	0.008	subestimado
G	T50	Gram-Charlier	11.5%	0.012	0.493	0.034	subestimado
G	T50	Normal	12.5%	0.004	0.206	0.008	subestimado
G	T75	Gram-Charlier	7.3%	0.333	0.291	0.359	no rechazado
G	T75	Normal	8.3%	0.170	0.682	0.358	no rechazado
ESG	BM	Gram-Charlier	14.6%	0.000	0.959	0.002	subestimado
ESG	BM	Normal	14.6%	0.000	0.959	0.002	subestimado
ESG	T25	Gram-Charlier	12.5%	0.004	0.664	0.015	subestimado
ESG	T25	Normal	13.5%	0.001	0.320	0.004	subestimado
ESG	T50	Gram-Charlier	9.4%	0.078	0.225	0.101	no rechazado
ESG	T50	Normal	10.4%	0.032	0.345	0.065	subestimado
ESG	T75	Gram-Charlier	7.3%	0.333	0.073	0.125	no rechazado
ESG	T75	Normal	9.4%	0.078	0.225	0.101	no rechazado

Tabla A2. Resumen de pérdida esperada (ES) en México con $\alpha = 5\%$ bajo las aproximaciones Normal y Gram-Charlier.

Pilar	Portafolio	ES empírico	ES prom. (GC)	ES prom. (Normal)	Brecha: emp. - GC	Brecha: emp. - Normal
E	BM	8.66%	5.95%	5.50%	2.71%	3.15%
E	T25	8.42%	6.15%	5.75%	2.27%	2.67%
E	T50	9.46%	7.34%	6.58%	2.13%	2.89%
E	T75	12.05%	10.60%	8.19%	1.45%	3.86%
S	BM	8.66%	5.95%	5.50%	2.71%	3.15%
S	T25	8.28%	6.23%	5.81%	2.06%	2.47%
S	T50	8.65%	7.21%	6.63%	1.44%	2.02%
S	T75	11.22%	9.38%	8.16%	1.84%	3.06%
G	BM	8.66%	5.95%	5.50%	2.71%	3.15%
G	T25	8.60%	6.08%	5.56%	2.51%	3.04%
G	T50	8.60%	6.60%	5.99%	2.01%	2.61%
G	T75	9.18%	7.77%	6.90%	1.41%	2.28%
ESG	BM	8.66%	5.95%	5.50%	2.71%	3.15%
ESG	T25	8.17%	6.14%	5.75%	2.03%	2.41%
ESG	T50	8.55%	7.09%	6.51%	1.46%	2.04%
ESG	T75	11.57%	9.36%	7.97%	2.21%	3.60%

REFERENCIAS

- [1] Albuquerque R, Koskinen Y, Yang S, Zhang C. Resiliency of environmental and social stocks: An analysis of the exogenous COVID-19 market crash. *The Review of Corporate Finance Studies*. 2020;9(3):593-621. doi:10.1093/rcfs/cfaa011.
- [2] Amel-Zadeh A, Serafeim G. Why and how investors use ESG information: Evidence from a global survey. *Financial Analysts Journal*. 2018;74(3):87-103. doi:10.2469/faj.v74.n3.2.
- [3] Bax K, Sahin Ö, Czado C, Paterlini S. ESG, risk, and (tail) dependence. *International Review of Financial Analysis*. 2023;87:102513. doi:10.1016/j.irfa.2023.102513.

- [4] Broadstock DC, Chan K, Cheng LTW, Wang XW. The role of ESG performance during times of financial crisis: Evidence from COVID-19 in China. *Finance Research Letters*. 2021;38:101716. doi:10.1016/j.frl.2020.101716.
- [5] Gillan SL, Koch A, Starks LT. Firms and social responsibility: A review of ESG and CSR research in corporate finance. *Journal of Corporate Finance*. 2021;66:101889. doi:10.1016/j.jcorpfin.2021.101889.
- [6] Hoepner AGF, Oikonomou I, Sautner Z, Starks LT, Zhou XY. ESG shareholder engagement and downside risk. *Review of Finance*. 2024;28(2):483-510. doi:10.1093/rof/rfad034.
- [7] Lashkaripour M. ESG tail risk: The Covid-19 market crash analysis. *Finance Research Letters*. 2023;53:103598. doi:10.1016/j.frl.2022.103598.
- [8] Lööf H, Sahamkhadam M, Stephan A. Is corporate social responsibility investing a free lunch? The relationship between ESG, tail risk, and upside potential of stocks before and during the COVID-19 crisis. *Finance Research Letters*. 2022;46:102499. doi:10.1016/j.frl.2021.102499.
- [9] Pedersen LH, Fitzgibbons S, Pomorski L. Responsible investing: The ESG-efficient frontier. *Journal of Financial Economics*. 2021;142(2):572-597. doi:10.1016/j.jfineco.2020.11.001.
- [10] Xidonas P, Essner E. On ESG portfolio construction: A multi-objective optimization approach. *Computational Economics*. 2024;63(1):21-45. doi:10.1007/s10614-022-10327-6.
- [11] Zhang J, De Spiegeleer J, Schoutens W. Implied tail risk and ESG ratings. *Mathematics*. 2021;9(14):1611. doi:10.3390/math9141611.

Análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada con reducción del rizo de corriente de entrada para aplicaciones con celda de combustible de hidrógeno**Closed-loop analysis of a cascade boost converter with input current ripple reduction for hydrogen fuel cell applications**Hidalgo-Leal H.D. ¹, Cruz-Gutiérrez F. ^{1*}, May-Burgos L.D. ¹, Sarao-Cruz L.D.J. ¹, Pérez-Aguilar A. ¹¹TecNM/ Instituto Tecnológico Superior de Villa La Venta

* Circuito Tecnológico No.1, Col. El Cuatro, C.P. 86418, La Venta Huimanguillo

Tabasco México

* faby.cg@laventa.tecnm.mx

Artículo Científico**Publicado: 31 de agosto 2026****RESUMEN**

En este trabajo se presenta el análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada modificado para aplicaciones con celda de combustible de hidrógeno. La propuesta se enfoca en la reducción del rizo de corriente de entrada mediante la selección adecuada de los parámetros del convertidor y su operación en una región específica. Se desarrolla el modelo matemático de la celda de combustible considerando sus características electroquímicas, el cual se implementa mediante una curva de polarización. Asimismo, se obtiene el modelo dinámico del convertidor en espacio de estados, el cual es posteriormente linealizado alrededor de un punto de operación para el diseño del controlador. El control del sistema se realiza mediante un compensador proporcional–integral (PI), diseñado en el dominio de la frecuencia utilizando criterios de estabilidad relativa a partir del diagrama de Bode. Los resultados de simulación muestran que el convertidor es capaz de operar en una condición cercana a la cancelación del rizo de corriente de entrada, así como mantener la regulación del voltaje de salida ante variaciones en la carga. Los resultados obtenidos validan la viabilidad de la topología propuesta para aplicaciones con celdas de combustible de hidrógeno.

Palabras clave: Convertidor elevador, celda de combustible, control PI, rizo de corriente, alta ganancia.

ABSTRACT

This paper presents the closed-loop analysis of a modified cascade boost converter for hydrogen fuel cell applications. The proposed approach focuses on reducing the input current ripple by properly selecting the converter parameters and operating within a specific region. A mathematical model of the fuel cell is developed considering its electrochemical characteristics and implemented through a polarization curve. Additionally, the dynamic model of the converter is obtained in state-space form and linearized around an operating point for control design purposes. The system is regulated using a proportional–integral (PI) controller designed in the frequency domain based on relative stability criteria through Bode analysis. Simulation results demonstrate that the converter operates near the input current ripple cancellation condition while maintaining output voltage

regulation under load variations. These results validate the feasibility of the proposed topology for hydrogen fuel cell applications.

Keywords: boost converter, fuel cell, PI control, current ripple, high gain.

INTRODUCCION

El uso de celdas de combustible de hidrógeno en sistemas de conversión de energía ha recibido una atención creciente debido a su alta eficiencia, baja emisión de contaminantes y viabilidad en aplicaciones estacionarias y de transporte. En particular, las celdas de combustible tipo PEM (Proton Exchange Membrane, por sus siglas en inglés) presentan características atractivas para sistemas eléctricos de potencia; sin embargo, su voltaje de salida suele ser bajo y depende fuertemente de la corriente demandada, por lo que resulta necesario emplear convertidores DC–DC que permitan elevar y regular el voltaje entregado a la carga [1]–[3].

Dentro de las topologías elevadoras, el convertidor Boost convencional y sus variantes han sido ampliamente utilizados por su simplicidad estructural y facilidad de implementación. No obstante, cuando se requieren altas relaciones de conversión, estas estructuras presentan desventajas asociadas a la operación con ciclos de trabajo elevados, mayores esfuerzos en los dispositivos semiconductores y reducción de la eficiencia [4], [5]. Por esta razón, en la literatura se han propuesto distintas configuraciones de convertidores de alta ganancia, entre las que destacan estructuras en cascada, arreglos con capacitores conmutados, inductores acoplados y convertidores entrelazados, las cuales permiten mejorar la relación de conversión sin operar en condiciones extremas [6]–[8].

En aplicaciones alimentadas por celdas de combustible PEM, el convertidor Boost convencional representa una de las soluciones más utilizadas debido a su estructura simple y facilidad de implementación. Sin embargo, cuando se requieren altas relaciones de elevación de voltaje, el convertidor debe operar con ciclos de trabajo cercanos a la unidad, lo que incrementa los esfuerzos eléctricos sobre los dispositivos semiconductores, reduce la eficiencia y deteriora el desempeño dinámico del sistema. Adicionalmente, la corriente absorbida desde la celda de combustible presenta un rizo significativo debido al proceso de conmutación del inductor de entrada, condición poco deseable en este tipo de fuentes electroquímicas, las cuales son sensibles a variaciones rápidas de corriente. La **Figura 1** ilustra de manera conceptual el comportamiento de un convertidor Boost convencional alimentado por una celda de combustible, resaltando tanto la presencia del rizo de corriente de entrada como las limitaciones asociadas a la obtención de altas ganancias de voltaje. En aplicaciones alimentadas por celdas de combustible, además de la ganancia de voltaje, un aspecto de especial interés es el rizo de corriente en la entrada del convertidor. A diferencia de otras fuentes, las celdas de combustible son sensibles a variaciones rápidas de corriente, las cuales pueden degradar su desempeño y afectar la vida útil del sistema. En consecuencia, diversos trabajos han abordado la reducción del rizo de corriente de entrada mediante técnicas como la conexión

entrelazada, el uso de inductores acoplados y configuraciones con corriente de entrada casi continua [9]–[12].

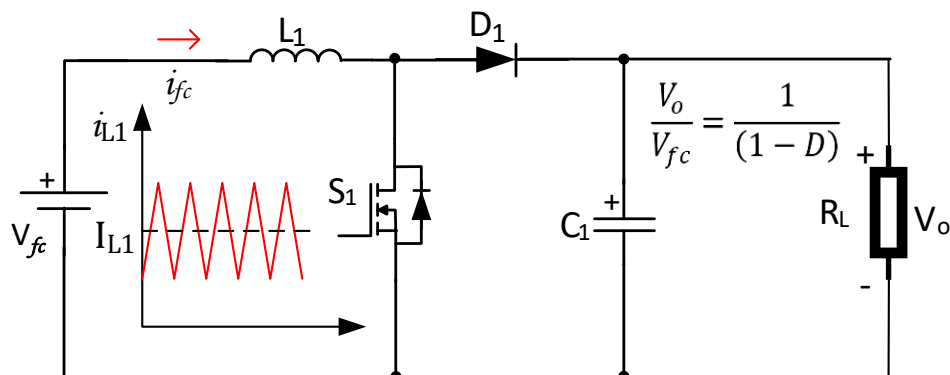


Figura 1 Representación conceptual de un convertidor Boost convencional alimentado por una celda de combustible PEM, mostrando el rizo de corriente de entrada y las limitaciones asociadas a la obtención de altas ganancias de voltaje.

Asimismo, se han reportado configuraciones elevadoras de alta ganancia que permiten obtener corrientes de entrada con rizo muy reducido o incluso nulo, evidenciando que la estructura del convertidor y la selección de sus parámetros influyen directamente en el comportamiento de la corriente de la fuente. Este aspecto resulta particularmente relevante en aplicaciones con fuentes electroquímicas, donde la calidad de la corriente de entrada impacta directamente en el desempeño del sistema [11], [12].

Por otra parte, los convertidores elevadores en cascada han sido ampliamente estudiados debido a su capacidad para lograr altas relaciones de conversión con esfuerzos moderados en los dispositivos. Sin embargo, en la mayoría de los trabajos, el análisis de estas topologías se centra en la ganancia estática, la eficiencia y la regulación del voltaje de salida, sin considerar de manera específica condiciones de operación orientadas a la reducción o cancelación del rizo de corriente de entrada. Asimismo, el estudio del comportamiento en lazo cerrado bajo dichas condiciones es limitado en la literatura [13].

Además del desarrollo de nuevas topologías, en la literatura reciente se han propuesto diversas estrategias de control para convertidores DC-DC con el propósito de mejorar la respuesta dinámica, incrementar la robustez frente a perturbaciones y reducir la sensibilidad a variaciones paramétricas. Entre las técnicas más empleadas se encuentran el control predictivo basado en modelos, el control por modos deslizantes y diversas variantes del controlador proporcional-integral (PI), las cuales han demostrado un desempeño satisfactorio en aplicaciones de conversión de potencia [14]–[16]. Si bien los métodos de control avanzados pueden ofrecer ventajas en términos de velocidad de respuesta y robustez, generalmente implican una mayor complejidad de implementación y un incremento en los requerimientos computacionales. En contraste, el controlador PI continúa siendo una de las estrategias más utilizadas en aplicaciones industriales debido a su simplicidad, facilidad de sintonización y desempeño confiable; además, investigaciones recientes han demostrado que

este esquema puede mejorarse mediante técnicas modernas de diseño para incrementar su desempeño sin perder sus ventajas de implementación [17]. Considerando que el objetivo principal de este trabajo es analizar el comportamiento en lazo cerrado del convertidor elevador en cascada y evaluar la reducción del rizo de corriente de entrada en una aplicación con celda de combustible PEM, se seleccionó un controlador PI como estrategia de regulación, permitiendo que el análisis se centre en el desempeño de la topología propuesta y no en la complejidad del algoritmo de control.

Adicionalmente, en el modelado de sistemas basados en celdas de combustible es común emplear representaciones simplificadas de la fuente mediante curvas de polarización implementadas a través de funciones algebraicas o tablas de consulta. Este enfoque permite capturar la naturaleza no lineal de la celda sin incrementar significativamente la complejidad del modelo dinámico, siendo adecuado para el análisis y validación de convertidores de potencia en entornos de simulación [3], [13].

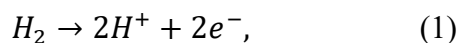
Aunque diversas topologías elevadoras con mecanismos de cancelación del rizo han sido reportadas previamente, la mayoría de los estudios se enfocan en el análisis del convertidor en lazo abierto o consideran fuentes ideales de tensión para evaluar su desempeño. En aplicaciones con celdas de combustible PEM, la calidad de la corriente demandada por el convertidor adquiere especial relevancia debido a la sensibilidad de estas fuentes a las variaciones rápidas de corriente.

En este contexto, la principal contribución de este trabajo consiste en analizar el comportamiento en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada alimentado por un modelo de celda de combustible basado en su curva de polarización, evaluando simultáneamente la regulación del voltaje de salida y la reducción del rizo de corriente de entrada bajo diferentes condiciones de operación.

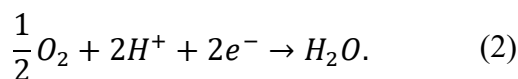
El objetivo de este trabajo es demostrar que la topología propuesta, operada en una región adecuada y bajo control en lazo cerrado, permite alcanzar una alta ganancia de voltaje con un rizo de corriente de entrada reducido en aplicaciones con celdas de combustible de hidrógeno, validando su desempeño mediante simulaciones.

MODELO MATEMÁTICO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible tipo son dispositivos electroquímicos capaces de convertir directamente la energía química del hidrógeno en energía eléctrica. Su operación se basa en reacciones electroquímicas que ocurren en dos electrodos separados por una membrana intercambiadora de protones, como se muestra en la **Figura 2**. En el ánodo, el hidrógeno se disocia en protones y electrones según



mientras que en el cátodo el oxígeno reacciona con los protones y electrones para formar agua, de acuerdo con



Como resultado, los electrones fluyen a través de un circuito externo generando corriente eléctrica. La reacción global del proceso puede expresarse como

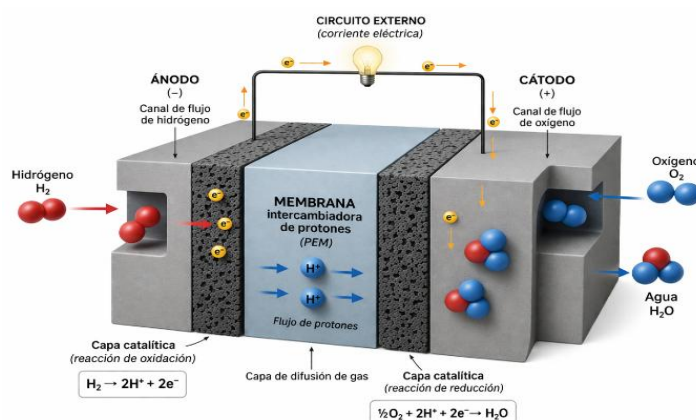
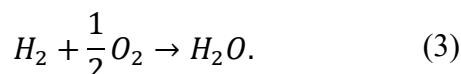


Figura 2 Esquema de una celda de combustible PEM

Desde el punto de vista eléctrico, el voltaje de salida de la celda de combustible está determinado por un valor ideal asociado a la energía libre de Gibbs, el cual puede calcularse mediante la ecuación de Nernst. Este voltaje ideal, denotado como E , depende de la temperatura de operación T y de las presiones parciales de los reactivos, y puede expresarse como:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (4)$$

donde E_0 es el potencial estándar de la celda, R es la constante universal de los gases, F es la constante de Faraday, y P_{H_2} , P_{O_2} y P_{H_2O} representan las presiones parciales del hidrógeno, oxígeno y agua, respectivamente. Sin embargo, en condiciones reales el voltaje de salida se reduce debido a diversos fenómenos irreversibles asociados a la cinética de reacción, las resistencias internas y las limitaciones en el transporte de masa.

En consecuencia, el voltaje real de la celda de combustible, denotado como V_{fc} , puede modelarse como la diferencia entre el voltaje ideal y las pérdidas internas:

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (5)$$

Las pérdidas por activación, asociadas a la energía requerida para iniciar las reacciones electroquímicas, pueden modelarse mediante una relación logarítmica en función de la corriente de la celda i_{fc} , dada por:

$$V_{act} = A \ln(i_{fc} + i_o) \quad (6)$$

donde A es una constante dependiente de la temperatura y del material del electrodo, e i_o es la corriente de intercambio. Por otro lado, las pérdidas óhmicas están relacionadas con la resistencia interna de la membrana y los contactos eléctricos, y pueden representarse como una caída de voltaje proporcional a la corriente:

$$V_{ohmic} = R_{int} i_{fc} \quad (7)$$

donde R_{int} es la resistencia interna equivalente de la celda. Finalmente, las pérdidas por concentración, debidas a limitaciones en el transporte de reactivos hacia las zonas activas, pueden modelarse como:

$$V_{conc} = B \ln\left(1 - \frac{i_{fc}}{i_{lim}}\right) \quad (8)$$

donde B es una constante empírica e i_{lim} representa el corriente límite de la celda.

ANÁLISIS DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA

Análisis en estado estable. El convertidor analizado en este trabajo corresponde a una topología elevadora de alta ganancia formada por una fuente de entrada V_{fc} , dos inductores L_1 y L_2 , dos interruptores activos S_1 y S_2 , dos diodos D_1 y D_2 , un capacitor de entrada C_1 , un capacitor de salida C_2 y una carga resistiva R_L . Esta estructura, reportada en [14], puede operar bajo dos estrategias de conmutación distintas: operación simultánea de los interruptores y operación complementaria. La **Figura 3** muestra la topología del convertidor considerada en este trabajo.

En una primera forma de operación, ambos interruptores conducen simultáneamente durante el intervalo de encendido. Bajo esta condición, el convertidor presenta un comportamiento equivalente al de un convertidor Boost en cascada.

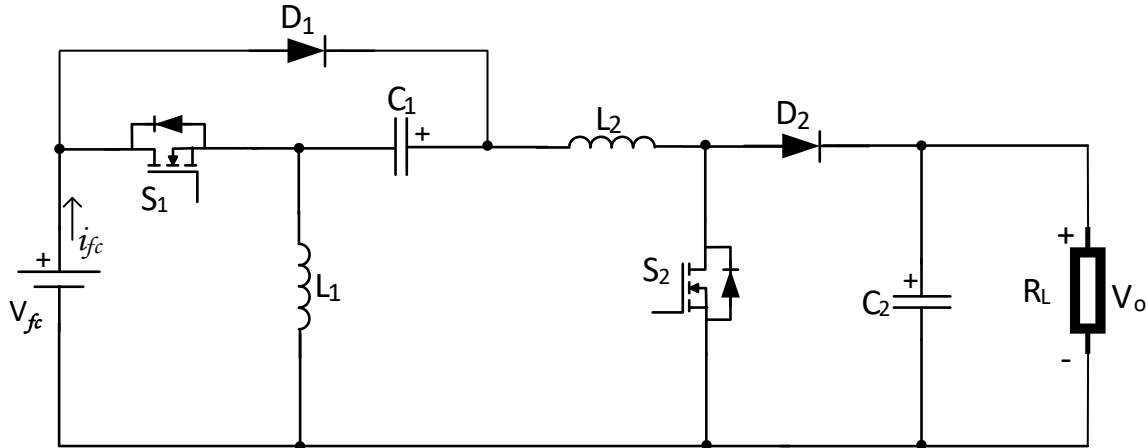


Figura 3 Topología del convertidor

Al aplicar el balance volt-segundo en los inductores, es decir, imponiendo que el valor promedio del voltaje en cada inductor durante un periodo de conmutación sea cero, se obtiene la ganancia estática

$$\frac{V_o}{V_{fc}} = \frac{1}{(1 - D)^2} \quad (9)$$

donde V_o es el voltaje de salida y V_{fc} es el voltaje de entrada. Esta expresión indica que la relación de conversión depende del cuadrado del término $(1 - D)$, por lo que el convertidor puede alcanzar elevados niveles de voltaje de salida usando valores moderados de ciclo de trabajo.

En la segunda forma de operación, los interruptores S_1 y S_2 conducen de manera complementaria, es decir, cuando uno está encendido el otro permanece apagado. En este caso, el intercambio de energía entre los elementos pasivos cambia y, al aplicar nuevamente balance volt-segundo, la ganancia en conducción continua resulta

$$\frac{V_o}{V_{fc}} = \frac{1}{D(1 - D)} \quad (10)$$

En esta ecuación, el término $D(1 - D)$ muestra que la ganancia depende de manera simétrica del ciclo de trabajo. De hecho, para $D = 0.5$ se obtiene la mínima ganancia, igual a 4, y para valores por encima o por debajo de ese punto la ganancia aumenta.

La corriente de entrada del convertidor, denotada como i_{fc} , está formada por la suma de las corrientes de los inductores i_{L1} e i_{L2} , es decir,

$$i_{fc} = i_{L1} + i_{L2} \quad (11)$$

donde i_{L1} es la corriente que circula por el inductor L_1 e i_{L2} es la corriente del inductor L_2 . Por tanto, el rizo de corriente de entrada depende directamente de la forma en que se superponen los rizados de ambas corrientes inductivas.

En operación complementaria, el rizo total de la corriente de entrada puede expresarse como

$$\Delta i_{fc} = -\frac{DV_{fc}}{2L_1}T_s + \frac{(1-D)V_{fc}}{2L_2}T_s \quad (12)$$

donde Δi_{fc} representa el rizo pico a pico de la corriente de entrada, L_1 y L_2 son los valores de los inductores y T_s es el periodo de conmutación. El primer término corresponde a la contribución del rizo del inductor L_1 , mientras que el segundo término representa la contribución del inductor L_2 . El signo negativo en el primer término y positivo en el segundo muestran que ambas contribuciones pueden oponerse entre sí.

Para imponer la condición de cancelación de rizo, se hace $\Delta i_{fc} = 0$, lo que conduce a la relación de diseño

$$L_2 = L_1 \frac{(1-D)}{D} \quad (13)$$

Esta ecuación establece que el valor de L_2 debe seleccionarse en función de L_1 y del ciclo de trabajo D para lograr que las pendientes de corriente de ambos inductores se compensen. En otras palabras, la cancelación del rizo de corriente de entrada no depende únicamente de la estrategia de control, sino también de la relación entre los elementos pasivos y del punto de operación seleccionado.

La importancia de esta condición radica en que permite definir una región de operación de muy bajo rizo, e incluso un punto específico de rizo nulo, lo cual es especialmente útil en aplicaciones con celdas de combustible de hidrógeno, ya que este tipo de fuente es sensible a las oscilaciones rápidas de corriente.

Modelo dinámico. Para obtener el modelo dinámico se considera la operación en modo de conducción continua (CCM), dispositivos ideales y capacitores con voltajes continuos dentro de un periodo de conmutación. Se define como variable de entrada el ciclo de trabajo u , con $0 < u < 1$, y como variable de salida el voltaje del capacitor de salida V_o . Los estados se eligen como: $x_1 = i_{L1}$, $x_2 = i_{L2}$, $x_3 = v_1$, $x_4 = v_o$, donde

v_1 es el voltaje del capacitor de entrada C_1 , y v_o es el voltaje del capacitor de salida C_2 . La fuente de entrada se denota como V_{fc} , ya que en este trabajo el convertidor es alimentado por la celda de combustible.

En la condición de operación complementaria, durante el intervalo en que S_1 conduce y S_2 permanece apagado, el convertidor queda descrito por:

$$\begin{aligned}
 L_1 \frac{di_{L1}}{dt} &= V_{fc} \\
 L_2 \frac{di_{L2}}{dt} &= -v_o + v_1 + V_{fc} \\
 C_1 \frac{dv_1}{dt} &= -i_{L2} \\
 C_2 \frac{dv_o}{dt} &= i_{L2} - \frac{v_o}{R_L}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Durante el intervalo complementario, cuando S_1 está apagado y S_2 conduce, las ecuaciones quedan:

$$\begin{aligned}
 L_1 \frac{di_{L1}}{dt} &= -v_1 + V_{fc} \\
 L_2 \frac{di_{L2}}{dt} &= V_{fc} \\
 C_1 \frac{dv_1}{dt} &= i_{L1} \\
 C_2 \frac{dv_o}{dt} &= -\frac{v_o}{R_L}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Estas ecuaciones muestran que la dinámica del convertidor depende del estado de conmutación y que el capacitor de entrada participa directamente en el intercambio de energía entre ambas etapas.

Definiendo u como la variable de control asociada al ciclo de trabajo, con $0 < u \ll 1$, y promediando sobre un periodo de conmutación, se obtiene el siguiente modelo no lineal:

$$\begin{aligned}
 L_1 \frac{di_{L1}}{dt} &= -(1-u)v_1 + V_{fc} \\
 L_2 \frac{di_{L2}}{dt} &= (v_1 - v_o)u + V_{fc} \\
 C_1 \frac{dv_1}{dt} &= (1-u)i_{L1} - i_{L2}u \\
 C_2 \frac{dv_o}{dt} &= i_{L2}u - \frac{v_o}{R_L}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Este modelo promedio es bilineal, ya que la variable de control u multiplica a variables de estado. La salida del sistema se define como $y = v_o$.

Para linealizar el sistema alrededor del punto de operación x_0 definido por $(I_{L1}, I_{L2}, V_1, V_2, D)$, se introducen pequeñas perturbaciones:

$$x = x_0 + \hat{x}, u = D + \hat{u}, V_{fc} = V_{fc0} + \hat{v}_{fc}$$

donde

$$\hat{x} = [\hat{i}_{L1} \quad \hat{i}_{L2} \quad \hat{v}_1 \quad \hat{v}_o]^T.$$

Despreciando términos de segundo orden, se obtiene el modelo linealizado:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B\hat{u} + E\hat{v}_{fc} \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (17)$$

con

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1-D}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_2} & -\frac{D}{L_2} \\ \frac{1-D}{C_1} & -\frac{D}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{C_2} & 0 & -\frac{1}{R_L C_2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} V_1/L_1 \\ (V_1 - V_o)/L_2 \\ -(I_{L1} + I_{L2})/C_1 \\ I_{L2}/C_2 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1/L_1 \\ 1/L_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

y

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Como la variable regulada es el voltaje de salida, la salida linealizada es simplemente:

$$\hat{y} = \hat{v}_o.$$

DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para obtener el punto de equilibrio, se impone la condición de estado estacionario:

$$\dot{\hat{i}}_{L1} = \dot{\hat{i}}_{L2} = \dot{\hat{v}}_1 = \dot{\hat{v}}_o = 0. \quad (18)$$

De (16) se pueden establecer los valores de las corrientes y voltajes requeridos para completar las matrices linealizadas del sistema en (17). Las corrientes de equilibrio quedan dadas por:

$$I_{L1} = \frac{V_o}{R_L(1-D)}, \quad (19)$$

$$I_{L2} = \frac{V_o}{R_LD}. \quad (20)$$

El voltaje del capacitor intermedio se puede calcular como:

$$V_1 = \frac{V_{fc}}{(1-D)}. \quad (21)$$

Con el fin de regular el voltaje de salida del convertidor, se emplea un controlador proporcional–integral (PI) diseñado a partir del modelo linealizado del sistema alrededor del punto de operación seleccionado. La variable controlada es el voltaje de salida v_o , mientras que la variable manipulada corresponde al ciclo de trabajo u . En este contexto, el diseño del controlador se basa en la función de transferencia control–salida del convertidor, definida como:

$$G_{vu}(s) = \frac{\hat{v}_o}{\hat{u}} = C(sI - A)^{-1}B. \quad (22)$$

donde $\hat{v}_o$ y $\hat{u}$ representan las perturbaciones del voltaje de salida y del ciclo de trabajo, respectivamente.

El controlador PI se define como

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (23)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y K_i es la ganancia integral.

El diseño se realiza en el dominio de la frecuencia mediante el análisis del diagrama de Bode, empleando un criterio de estabilidad relativa. Para ello, se considera la función de transferencia en lazo abierto del sistema compensado:

$$G_L(s) = G_c(s)G_{vu}(s). \quad (24)$$

A partir de la respuesta en frecuencia de la planta $G_{vu}(s)$, se selecciona una frecuencia de cruce ω_c adecuada, de modo que el sistema presente un compromiso entre rapidez de respuesta y robustez.

Posteriormente, el cero del controlador PI se ubica en una frecuencia inferior a ω_c , con el objetivo de mejorar el margen de fase del sistema. Finalmente, la ganancia del controlador se ajusta para que el módulo del lazo abierto cumpla la condición:

$$|G_L(j\omega_c)| = 1. \quad (25)$$

Antes del diseño del controlador, se establecen los valores nominales del convertidor, los cuales se resumen en la **Tabla 1**. La selección de estos parámetros se realiza considerando una aplicación con celda de combustible de hidrógeno, cuyo voltaje máximo de entrada es de 35 V, una potencia nominal de salida de 500 W y un voltaje de salida deseado de 150 V.

Tabla 1. Parámetros nominales del convertidor

Parámetro	Valor
Voltaje máximo V_{fc}	35 V
Voltaje de salida V_o	150 V
Potencia de salida	500 W
Capacitor C_1, C_2	47 μ F
Inductor L_1	500 μ H
Inductor L_2	295 μ H

Dado que el convertidor opera en el modo de cancelación de rizo, su ganancia estática viene dada por (10). Sustituyendo $V_o = 150$ V y $V_{fc} = 35$ V, se obtiene un ciclo de trabajo de $D \approx 0.63$.

Una vez determinado el ciclo de trabajo, el valor del inductor L_2 se calcula a partir de la condición de cancelación del rizo de corriente de entrada (13). Tomando $L_1 = 500$ μ H y $D=0.63$, resulta $L_2 = 295$ μ H. De esta manera, la relación entre inductores queda establecida de forma consistente con el punto de operación nominal seleccionado. Por otra parte, considerando una potencia nominal de 500W y un voltaje de salida de 150 V, la resistencia equivalente de carga es $R_L = 45$ Ω .

El comportamiento del sistema compensado se evalúa mediante el diagrama de Bode de la función de transferencia en lazo abierto $G_L(s)$, mostrado en la **Figura 4**, el cual permite determinar directamente los márgenes de estabilidad del sistema.

A partir de dicho diagrama, se verifican el margen de fase M_f y el margen de ganancia M_g , asegurando que el sistema cumpla con los criterios de estabilidad relativa establecidos. En particular, el margen de fase proporciona una medida del amortiguamiento del sistema, mientras que el margen de ganancia indica la robustez frente a variaciones en la ganancia del lazo.

Con base en el procedimiento descrito, los parámetros del controlador PI se determinan de manera que se satisfagan las especificaciones de frecuencia de cruce y margen de fase. En consecuencia, se obtienen:

$$K_p = 8.143e - 05$$

$$K_i = 0.3257$$

por lo que el controlador final queda definido como:

$$G_c(s) = \frac{8.143e - 05s + 0.3257}{s}$$

El controlador diseñado se implementa en una estructura de retroalimentación unitaria, donde el error de seguimiento está dado por:

$$e(t) = v_{ref} - v_o$$

Siendo v_{ref} la referencia de voltaje. La acción de control generada por el compensador PI ajusta el ciclo de trabajo del convertidor, permitiendo mantener el voltaje de salida regulado ante variaciones en la carga y en el voltaje de la celda de combustible.

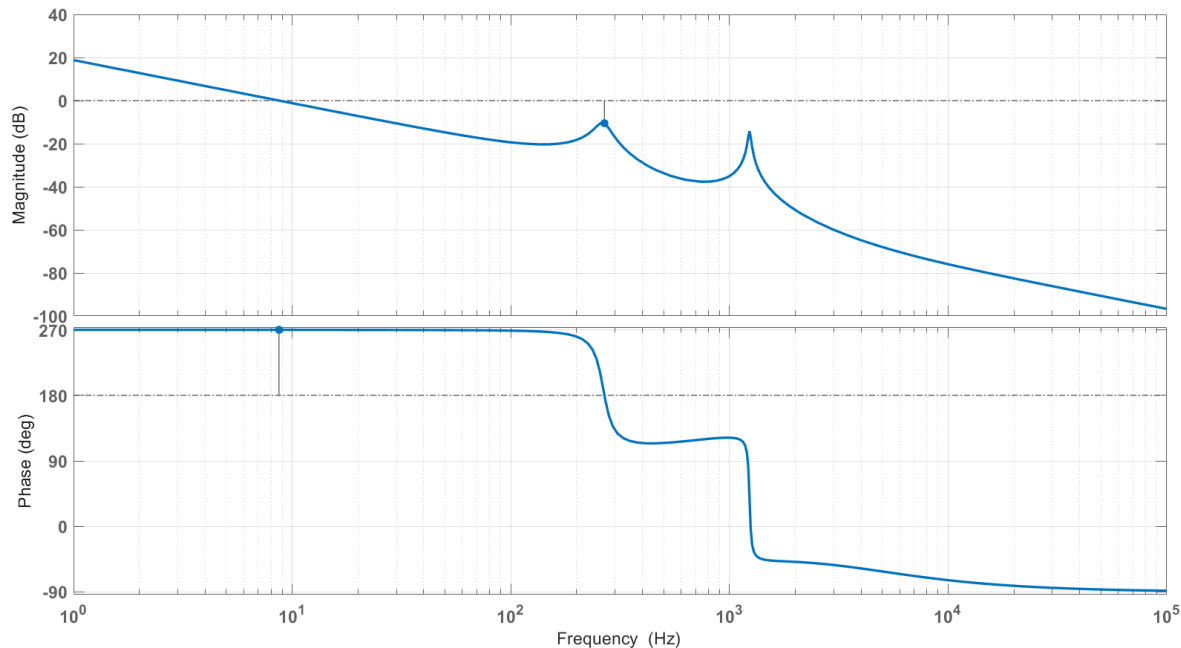


Figura 4. Diagrama de Bode del sistema en lazo abierto compensado

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Con el objetivo de validar el desempeño del convertidor propuesto y del esquema de control implementado, se realizaron diversas simulaciones en entorno MATLAB/Simulink considerando el modelo de la celda de combustible y los parámetros nominales previamente definidos.

Se presentan dos pruebas principales orientadas a evaluar, por un lado, el comportamiento del rizo de corriente de entrada en función del punto de operación y, por otro, la capacidad de regulación

del sistema en lazo cerrado ante variaciones de carga. Adicionalmente, se incluye la curva de polarización de la celda de combustible utilizada en la simulación.

En la primera prueba, se analizó el efecto del ciclo de trabajo sobre el rizo de corriente de entrada del convertidor. Para ello, se consideraron dos valores cercanos al punto de operación nominal, específicamente $D=0.63$ y $D=0.65$ a los 0.3 s, como se muestra en la **Figura 5**.

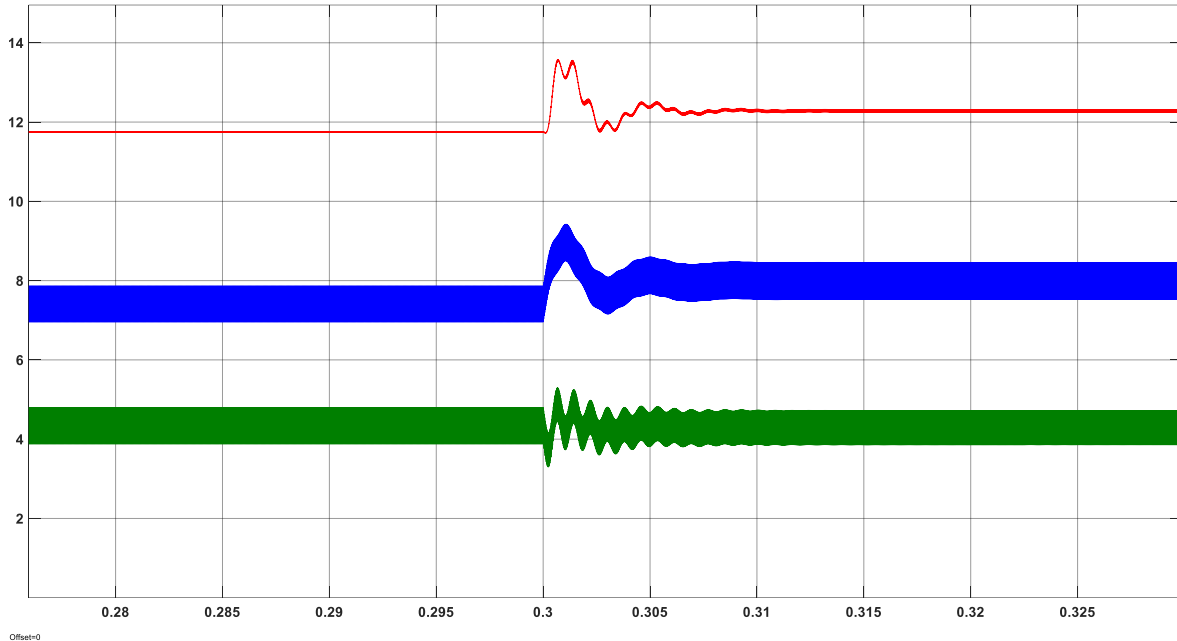


Figura 5. Corriente de entrada para diferentes ciclos de trabajo, línea roja corriente de entrada, línea azul corriente del inductor L_1 y línea verde corriente del inductor L_2 .

La figura correspondiente muestra la forma de onda de la corriente de entrada bajo ambas condiciones. Se observa que, para un valor específico del ciclo de trabajo, el rizo de corriente se reduce notablemente, evidenciando la existencia de un punto de operación donde ocurre la cancelación del rizo. Sin embargo, al alejarse de dicho punto, el rizo reaparece, lo cual confirma la dependencia directa de este fenómeno con el ciclo de trabajo y la relación entre los inductores.

Este comportamiento es consistente con el análisis teórico presentado, donde se establece que la anulación del rizo de corriente de entrada se logra únicamente bajo una condición específica de operación.

La **Tabla 2** presenta la comparación del rizo de corriente de entrada para tres ciclos de trabajo representativos. En todos los casos, el convertidor propuesto exhibe una reducción significativa del rizo respecto al convertidor Boost convencional, manteniendo la misma potencia de salida y utilizando el mismo valor de inductancia y capacitancia, L_1 y C_1 , respectivamente. Estos resultados confirman que la disminución del rizo es consecuencia de la estrategia de cancelación implementada y no de un aumento en la capacidad de almacenamiento de energía del inductor.

Tabla 2. Comparación del rizo de corriente de entrada para diferentes ciclos de trabajo

D	Boost convencional Δi_{fc} (A)	Convertidor del estudio Δi_{fc} (A)	Boost convencional V_o (V)	Convertidor del estudio V_o (V)	Potencia de salida (W)	Reducción (%)
0.60	1.733	0.259	147	246	300	85
0.63	1.836	0.023	160	254	300	98
0.66	1.944	0.217	174	263	300	88

En la segunda prueba, se evaluó el desempeño del sistema en lazo cerrado ante un cambio en la carga. En particular, se consideró una variación del 50% al 100% de la carga nominal, es decir, de $R_L = 90 \Omega$ a $R_L = 45 \Omega$, como se aprecia en la **Figura 6**.

La figura muestra la respuesta del voltaje de salida ante esta perturbación. Se puede observar que el sistema presenta una desviación transitoria seguida de una recuperación hacia el valor de referencia, evidenciando la capacidad del controlador para mantener la regulación del voltaje.

En general, el comportamiento observado indica que el sistema es capaz de adaptarse a cambios en la carga sin perder estabilidad, lo cual valida el diseño del controlador en lazo cerrado.

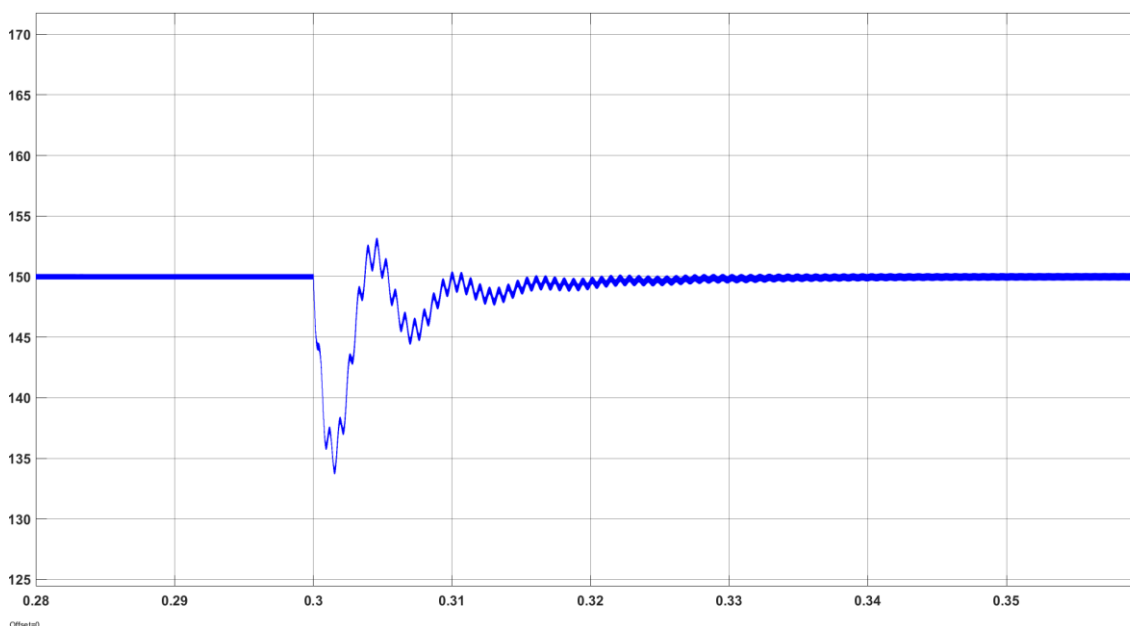


Figura 6 Respuesta del voltaje de salida ante cambio de carga

Finalmente, se incluye la curva de polarización (**Figura 7**) de la celda de combustible utilizada en la simulación, la cual describe la relación entre el voltaje y la corriente de la fuente.

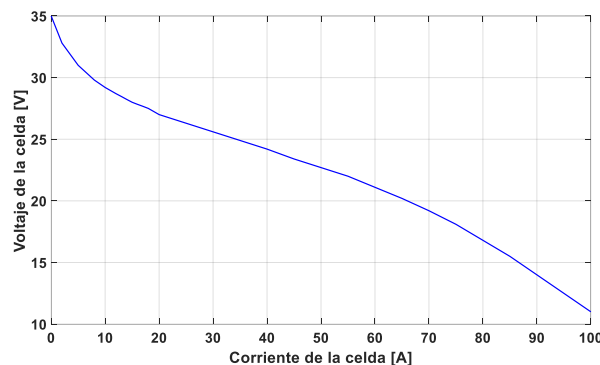


Figura 7 Curva de polarización de la celda de combustible

En esta curva se identifican las tres regiones características de operación: la región de activación, la región óhmica y la región de concentración. Esta representación permite modelar de manera adecuada el comportamiento no lineal de la celda de combustible dentro del sistema de simulación.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que el convertidor elevador en cascada propuesto es capaz de operar en una condición específica, donde el rizo de corriente de entrada se reduce significativamente e incluso puede anularse, lo cual concuerda con el análisis teórico planteado. Este comportamiento confirma que la cancelación del rizo depende directamente de la relación entre los inductores y del ciclo de trabajo.

En comparación con otros enfoques reportados en la literatura, donde la reducción del rizo se logra mediante técnicas como el entrelazado o el uso de inductores acoplados [9], [10], la propuesta presentada permite alcanzar resultados similares mediante una configuración más simple basada en la selección adecuada de parámetros. De igual forma, los resultados presentados son consistentes con trabajos recientes sobre convertidores de alta ganancia con bajo rizo de entrada [11], [12], destacando que en este caso se incorpora además el análisis en lazo cerrado.

Cabe destacar que el controlador PI diseñado mostró un desempeño adecuado, permitiendo regular el voltaje de salida ante variaciones en la carga sin comprometer la estabilidad del sistema.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó el análisis en lazo cerrado de un convertidor elevador en cascada modificado aplicado a sistemas alimentados por celdas de combustible de hidrógeno. A partir del análisis en estado estable, se identificó una condición de operación en la cual es posible reducir

significativamente el rizo de corriente de entrada, e incluso anularlo, mediante una adecuada selección de los parámetros del convertidor, particularmente la relación entre los inductores.

Se desarrolló el modelo dinámico del convertidor considerando la interacción con la celda de combustible, representada mediante una curva de polarización, lo cual permitió capturar su comportamiento no lineal sin incrementar excesivamente la complejidad del modelo. A partir de este modelo, se diseñó un controlador PI en el dominio de la frecuencia utilizando criterios de estabilidad relativa, garantizando un compromiso adecuado entre robustez y desempeño dinámico.

Los resultados de simulación demostraron que el convertidor opera efectivamente en una región de bajo rizo de corriente de entrada y que el sistema en lazo cerrado es capaz de mantener la regulación del voltaje de salida ante variaciones en la carga. Estos resultados evidencian que la topología propuesta, en conjunto con el esquema de control implementado, presenta un desempeño favorable para aplicaciones con celdas de combustible, donde la calidad de la corriente de entrada constituye un aspecto de especial importancia.

Si bien los resultados obtenidos respaldan el desempeño del convertidor propuesto bajo las condiciones de simulación consideradas, la implementación de un prototipo experimental constituye una etapa futura de esta investigación. Dicha validación permitirá corroborar el comportamiento del sistema bajo condiciones reales de operación, así como evaluar el efecto de las pérdidas parásitas, las tolerancias de los componentes y otros fenómenos no considerados en el modelo de simulación.

En este sentido, el presente estudio establece una base para el análisis e implementación futura de convertidores elevadores con reducción del rizo de corriente de entrada en aplicaciones alimentadas por celdas de combustible PEM.

REFERENCIAS

- [1] Belhaj F. Z., et al. (2019). Cascade boost converter for fuel cell systems. Springer.
- [2] Dawidziuk J. (2011). Review of high efficiency boost converters. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, 59(4), 499–506.
- [3] Eberle U., Müller B., von Helmolt R. (2012). Fuel cell electric vehicles and hydrogen infrastructure. Energy & Environmental Science, 5(10), 8780–8798.
- [4] Erickson R. W., Maksimovic D. (2001). Fundamentals of Power Electronics. Springer.
- [5] Garraín D., Lechón Y., de la Rúa C. (2011). Polymer electrolyte membrane fuel cells in automotive applications. Smart Grid and Renewable Energy, 2(2), 68–74.
- [6] Hidalgo H., et al. (2023). High-gain boost converter with zero-ripple input current. Energies, 16(13), 4860.

- [7] Hidalgo H., et al. (2023). Zero-ripple input current boost converter. *Technologies*, 11(1), 21.
- [8] Hidalgo H., Estrada L., Vázquez N., Mejía D., Huerta H. and González-Durán J. E. E. (2026). Voltage regulation of a DC–DC boost converter using a vertex-based convex PI controller. *Technologies*, 14(1), 30.
- [9] Jin G. G., Mengesha K. A. and Son Y. D. (2025). Integral sliding mode control of a DC–DC boost converter with uncertainties. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20.
- [10] Li W., He X. (2011). Review of non-isolated high step-up DC/DC converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1239–1250.
- [11] Lotfi Nejad M., et al. (2016). New cascade boost converter with reduced losses. *IET Power Electronics*.
- [12] A. Naderi and K. Abbaszadeh (2016). High step-up DC–DC converter with input current ripple cancellation. *IET Power Electronics*, 9(12), 2394–2403.
- [13] Niu R., Zhang H. and Song J. (2023). Model predictive control of DC–DC boost converter based on generalized proportional integral observer. *Energies*, 16(3), 1245.
- [14] Pirpoor S., et al. (2022). High-gain DC/DC converter with low input current ripple. *IEEE Access*.
- [15] Puranik S. V., Keyhani+ A., Khorrami F. (2010). State-space modeling of proton exchange membrane fuel cell. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 804–813.
- [16] Rosas-Caro J. C., et al. (2013). Interleaved converter with ripple cancellation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [17] Villarreal-Hernandez C. A., et al. (2020). Double dual boost converter with ripple cancellation for PEMFC. *Electronics*, 9(10), 1592.