

ISSN: 2992-8710

Memorias del Congreso Internacional de Energía de la Academia Mexicana de Energía

No. 8

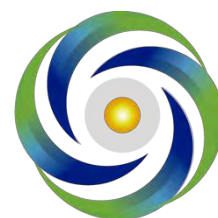
Enero-Diciembre 2025

Publicación anual

Redefiniendo el rumbo de la energía ante el cambio
climático



Academia Mexicana de Energía, A.C.



Editores de la publicación:

Cecilia Martín del Campo

Héctor F. Puebla Núñez

Héctor Hugo León Santiesteban

José Antonio Colín Luna

Margarita M. González Brambila

Pamela Fran Nelson Edelstein

MEMORIAS DEL CONGRESO INTERNACIONAL DE ENERGÍA DE LA ACADEMIA MEXICANA DE ENERGÍA. Núm. 8, enero-diciembre 2025, es una publicación anual de la Academia Mexicana de Energía, A.C. Calle Tehuantepec No. 39, Col. Roma Sur, Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06760 Ciudad de México, México. Página electrónica de la revista: <https://www.amexen.org/memorias.html> y dirección electrónica: jacl@azc.uam.mx Editor responsable: Dr. José Antonio Colín Luna. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título 04-2024-011914253400-102, ISSN 2992-8710, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dr. José Antonio Colín Luna. Calle Tehuantepec No. 39, Col. Roma Sur, Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06760 Ciudad de México, México. Fecha de última modificación: 19 de diciembre de 2025. Tamaño del archivo: 35 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Academia Mexicana de Energía, A.C.

Memorias del Congreso Internacional de Energía de la Academia Mexicana de Energía

No. 8
Enero-Diciembre 2025

“Redefiniendo el rumbo de la energía ante el cambio
climático”

Instituciones Organizadoras



ACADEMIA MEXICANA DE ENERGÍA, A. C.

PRESIDENTE

José Antonio Colín Luna
Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco

VICEPRESIDENTE

Leo Alvarado Perea
Universidad Autónoma de Zacatecas

SECRETARIO

Gonzalo Alonso Ramos López
CICATA-QRO.

TESORERO

Héctor Hugo León Santiesteban
Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco

VOCAL DE COMISIONES DE ESPECIALIDAD

Carlos Omar Castillo Araiza
Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa

VOCAL DE COMUNICACIÓN

Camilo Arancibia Bulnes
Instituto de Energías Renovables -UNAM

VOCAL DE DELEGACIONES Y REPRESENTACIONES

REGIONALES

Sara Núñez Correa
Universidad Veracruzana

VOCAL DE EVENTOS TÉCNICOS

Héctor Puebla Núñez
Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco

VOCAL DE RELACIONES INSTITUCIONALES

Alfonso Talavera López
Universidad Autónoma de Zacatecas

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

RECTOR GENERAL

Gustavo Pacheco López

SECRETARIA GENERAL

Esthela Irene Sotelo Núñez

UNIDAD AZCAPOTZALCO

Rector

Yadira Zavala Osorio

Secretaria

Salvador Ulises Islas Barajas

UNIDAD CUAJIMALPA

Rector

Alfonso Mauricio Sales Cruz

Secretaria

María De Lourdes Delgado Núñez

UNIDAD IZTAPALAPA

Rector

Verónica Medina Bañuelos

Secretario

Javier Rodríguez Lagunas

UNIDAD LERMA

Rector

Gabriel Soto Cortés

Secretario

Alma Patricia de León Calderón

UNIDAD XOCHIMILCO

Rector

María Angélica Buendía Espinosa

Secretario

Irma Gabriela Anaya Saavedra

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
ZACATECAS**

RECTOR

Ángel Román Gutiérrez

SECRETARIO GENERAL

Lorena Jiménez Sandoval

SECRETARIO ACADÉMICO

Hans Hiram Pacheco García

**COORDINADORA DEL CONSEJO
ACADÉMICO DEL ÁREA DE
INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍA**

María de Lourdes Oliván Tiscareño

**COORDINADOR DEL CONSEJO
ACADÉMICO DEL ÁREA DE
CIENCIAS DE LA SALUD**

Juan Armando Flores de la Torre

**DIRECTORA UNIDAD ACADÉMICA
DE CIENCIAS QUÍMICAS**

Maria Argelia López Luna

**DIRECTOR UNIDAD ACADÉMICA DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Jorge Issac Galván Tejada

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

DIRECTOR GENERAL

Arturo Reyes Sandoval

SECRETARIA GENERAL

Juan Manuel Cantú Vázquez

SECRETARIO ACADÉMICO

David Jaramillo Vígueras

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y
POSGRADO**

Heberto Antonio Marcelino Balmori
Ramírez

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA
AVANZADA UNIDAD QUERÉTARO**

Director

Juan Bautista Hurtado Ramos

Subdirectora Académica

Marlenne Gómez Ramírez

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES**

DIRECTOR

Miguel Robles Pérez

SECRETARIO ACADÉMICO

Osvaldo Rodríguez Hernández

SECRETARIA ADMINISTRATIVA

Beatriz Olvera Rodríguez

SECRETARIO TÉCNICO

Francisco Javier Rojas Menéndez

SECRETARIA DE GESTIÓN TECNOLÓGICA

Celeste Morales Santiago

COLEGIO DE INGENIEROS PETROLEROS DE MÉXICO

CONSEJO DIRECTIVO

Dr. Eduardo Poblano Romero

Presidente

Dr. Jorge Enrique Paredes Enciso

Vicepresidente

Dr. Rafael Guerrero Altamirano

Primer Secretario Propietario

Dr. Luis Manuel Pereira

Segundo Secretario Propietario

Dr. León Mena Velázquez

Tesorero

Dr. Abigail Martínez Hernández

Primer Secretario Suplente

Dr. Jesús Rojas Palma

Segundo Secretario Suplente

Dr. Alfonso Palacios Roque

Subtesorero

COLEGIO DE INGENIEROS PETROLEROS DE MÉXICO
Sede México

Dr. Carlos Pérez Téllez
Gerente

Dra. Sandra Méndez Sánchez
Coordinación de tesorería

Maricarmen Romero Vega
Coordinación administrativa

José de Jesús Cruz Aguilar
Desarrollo profesional

ACADEMIA DE INGENIERÍA DE MÉXICO

Consejo Directivo

M. en I. Alberto Lepe Zúñiga
Presidente

Dr. Guillermo Aguirre Esponda
Vicepresidente

Ing. Guillermo Casar Marcos
Secretario

Dra. Mariana Vicario
Prosecretaria

Dr. Carlos Pérez Téllez
Prosecretario

Dr. David de León Escobedo
Protesorero

FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas.

Rector

Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. José Antonio Hernández Espriú

Director Facultad de Ingeniería, UNAM

Dra. Aída Huerta Barrientos.

Secretaria de Posgrado e Investigación

Facultad de Ingeniería, UNAM

Mtro. Víctor Manuel Rivera Romy.

Jefe de la División de Educación Continua y a

Distancia

Facultad de Ingeniería, UNAM



Academia
Mexicana de
Energía, A. C.

Comité Organizador

JOSÉ ANTONIO COLÍN LUNA

Coordinador General

Universidad Autónoma Metropolitana,
Azcapotzalco.
México

MARGARITA M. GONZÁLEZ BRAMBILA

Coordinadora Honoraria

Universidad Autónoma Metropolitana,
Azcapotzalco.
México

GONZALO ALONSO RAMOS LÓPEZ

Secretario de la Conferencia

Instituto Politécnico Nacional
CICATA-QRO
México

HÉCTOR HUGO LEÓN SANTIESTEBAN

Tesorero de la Conferencia

Universidad Autónoma Metropolitana,
Azcapotzalco.
México

CARLOS OMAR CASTILLO ARAIZA

Coordinador del Comité Científico

Universidad Autónoma Metropolitana,
Iztapalapa.
México

LEO ALVARADO PEREA

Coordinador del Comité Técnico

Universidad Autónoma de Zacatecas.
México

ALFONSO TALAVERA LÓPEZ

Coordinador de Arregos locales

Universidad Autónoma de Zacatecas.
México

RUBÉN DORANTES RODRÍGUEZ

Coordinador de Relaciones Públicas

Universidad Autónoma Metropolitana,
Azcapotzalco.
México



Academia
Mexicana de
Energía, A. C.

Comité Científico

Coordinadores Generales

Dr. Carlos Omar Castillo Araiza
Universidad Autónoma Metropolitana
Iztapalapa.

Dr. José Antonio Colín Luna
Universidad Autónoma Metropolitana
Azcapotzalco.

Dr. Gonzalo Alonso Ramos López
CICATA – QRO.
IPN

Dr. Julio César García Martínez
ENCB
IPN

Comité Científico Nacional

Dr. Héctor Puebla Núñez
Universidad Autónoma Metropolitana –
Azcapotzalco

Dra. Ana Karina Medina Mendoza
Universidad Autónoma Metropolitana
Azcapotzalco

Dra. Rosa de Guadalupe González
ESIQUE, Instituto Politécnico Nacional,
México

Dr. Rubén Dorantes Rodríguez
Universidad Autónoma Metropolitana -
Azcapotzalco

Dr. Benito Serrano Rosales
Profesor Jubilado
Universidad Autónoma de Zacatecas

Dr. Lázaro Canizalez Dávalos
Universidad Autónoma de Zacatecas

Dr. Alfonso Talavera López
Universidad Autónoma de Zacatecas

Dra. Heidi Villafán Vidales
Instituto de Energías Renovables
- UNAM

Dra. Margarita González Brambila
Universidad Autónoma Metropolitana -
Azcapotzalco

Dra. Cecilia Martín del Campo
Facultad de Ingeniería
UNAM

Dr. José Luis Contreras Larios
Universidad Autónoma Metropolitana –
Azcapotzalco

Dra. Claudia Yolanda Valero Luna
Universidad Autónoma de Zacatecas

Dr. Héctor Hugo León Santiesteban
Universidad Autónoma Metropolitana –
Azcapotzalco

Dra. Sara Núñez Correa
Universidad Veracruzana –
Coatzacoalcos, Ver.

Dr. Leo Alvarado Perea
Universidad Autónoma de Zacatecas

Dr. Gilberto Espinosa Paredes
Universidad Autónoma Metropolitana –
Azcapotzalco

Dr. Aníbal Figueroa Castrejón
Universidad Autónoma Metropolitana –
Azcapotzalco



Academia
Mexicana de
Energía, A. C.

Dr. Camilo Arancibia Bulnes

Instituto de Energías Renovables
- UNAM

Dr. Rafael Maya Yescas

Universidad Michoacana de San Nicolas
de Hidalgo

Dra. Gladys Jiménez García

Instituto Tecnológico Superior de
Pátzcuaro

Dr. José Escobar Aguilar

Instituto Mexicano del Petróleo



Academia
Mexicana de
Energía, A. C.

Comité Científico Internacional

Dr. Claudio Zaror Z.

Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción, Chile.

Dr. P. R. Naren

School of Chemical & Biotechnology
SASTRA Deemed to be University, India.

Dr. Abhishek Dutta

Department of Chemical Engineering
Izmir Institute of Technology, Turquía.

Dr. Edgar Mauricio Morales Valencia

Centro de Investigaciones en Catálisis
Instituto Universitario de la Paz-UNIPAZ,
Colombia.

Dr. Hugo de Lasa

Department of Chemical and Biochemical
Engineering, Western University,
Canada.

Dr. Edwing Alexander Velasco Roza

Universidad Industrial de Santander-UIS
Instituto Universitario de la Paz-UNIPAZ

Dr. Luis Alberto Ricardez Sandoval

Chemical Engineering Department
University of Waterloo. Canada.

Dra. Ilda O. Santos Mendoza

Centre R&D – ACC Automotive Cell
Company

Dr. Manuel Collares Pereira

Universidade de Évora
Portugal

Dr. Joris W. Thybaut

Universidad de Gante,
Bélgica

Dr. Subha R. Das

Universidad de Carnegie
Mellon, Estados Unidos,
Bélgica

Dr. Antonio Monzón Bescós

Universidad de Zaragoza,
España

Comité Revisor

Dr. Sergio Antonio Gómez Torres

Universidad Autónoma Metropolitana –
Iztapalapa

Dr. Carlos Omar Castillo Araiza

Universidad Autónoma Metropolitana
Iztapalapa.

Dr. José Antonio Colín Luna

Universidad Autónoma Metropolitana
Azcapotzalco.

Dr. Héctor Puebla Núñez

Universidad Autónoma Metropolitana –
Azcapotzalco

Dra. Margarita González Brambila

Universidad Autónoma Metropolitana -
Azcapotzalco

Dr. Rubén Dorantes Rodríguez

Universidad Autónoma Metropolitana -
Azcapotzalco

Dr. Benito Serrano Rosales

Profesor Jubilado
Universidad Autónoma de Zacatecas.

Dr. Lázaro Canizalez Dávalos

Universidad Autónoma de Zacatecas

Dra. Ana Karina Medina Mendoza

Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco

Dr. Alfonso Talavera López

Universidad Autónoma de Zacatecas

M. en I.P. Emigdio Gregorio Zamora Rodea

Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco

M. en I.P. Diana Alejandra García Martínez

Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco

Dr. Alan Bañuelos Frías

Universidad Autónoma de Zacatecas

Dra. Mariana Rodríguez Jara

Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco

Dr. Eduardo Ramírez Castelan

Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco

Dra. Heidi Villafán Vidales

Instituto de Energías Renovables
UNAM

Dr. Gonzalo Alonso Ramos López

CICATA-QRO.
IPN

Dra. Margarita González Brambila

Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco

Dr. Julio César García Martínez

ESCB-IPN

Dra. Cecilia Martín del Campo

FACULTAD DE INGENIERIA
UNAM

Dr. José Fernando Duran Pérez

Universidad Autónoma Metropolitana
Iztapalapa

Dr. José Luis Contreras Larios

Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco



Dra. Claudia Yolanda Valero Luna
Universidad Autónoma de Zacatecas

Dra. María Eugenia Hernández Terán
Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco

Dra. Sara Núñez Correa
Universidad Autónoma Metropolitana-
Azcapotzalco

Dr. Gilberto Espinosa Paredes
Universidad Autónoma Metropolitana
Iztapalapa.

Dra. Alejandrina Denisse Pérez Valseca
Universidad Autónoma Metropolitana
Iztapalapa.

Índice

CIE2025-199	Diseño óptimo de redes usuarias de agua con integración térmica: un caso de estudio de gran escala 2w10u4j	1
CIE2025-203	Techos verdes y confort: estudio en ocho ciudades mexicanas	7
CIE2025-205	Techos fríos: cómo pintar tu vivienda podría ayudar al planeta (y a tu bolsillo)	14
CIE2025-206	Hidrógeno blanco, energía limpia y renovable que emerge de la Tierra	21
CIE2025-207	Una propuesta de política pública para fortalecer la formación de recursos humanos en el área de la energía nuclear	27
CIE2025-208	Diseño de un sistema de climatización para un estabulado utilizando biomasa como fuente de energía	35
CIE2025-209	Construcción de un banco de pruebas para la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos	43
CIE2025-210	Evaluación experimental de la velocidad de aire en el interior de un colector solar de doble paso	50
CIE2025-212	Análisis crítico de las normas mexicanas de eficiencia energética en edificaciones	56

CIE2025-213	Modelos de confort térmico adaptativo para edificaciones en México	64
CIE2025-214	Homogenización de flujo solar concentrado de un horno solar sobre un reactor cilíndrico	71
CIE2025-215	Revalorización del bagazo de malta cervecera para la producción de bioetanol	79
CIE2025-217	Hidrodesoxigenación de aceites del fruto de <i>elaeis guineensis</i> para la obtención de fracciones combustibles verdes	85
CIE2025-220	Sistemas Biofotocatalíticos para la generación de hidrógeno empleando un consorcio nativo de microalgas	91
CIE2025-221	Fe ₂ O ₃ -FeOOH NPs to transform CO ₂ into organic compounds with H ₂ O ₂ and solar radiation	96
CIE2025-230	Plan de despliegue de reactores nucleares para México	100
CIE2025-231	Evaluación de procesos biohíbridos para la remoción de contaminantes en agua residual y la generación de biohidrógeno con un consorcio de microalgas	107
CIE2025-232	Celdas solares de Perovskita fabricadas por dispersión por barra en condiciones ambientales usando disolventes de vaporización alta	113
CIE2025-233	Análisis de diseños recientes de redes de intercambio de calor para el caso de estudio 9SP	120

CIE2025-234	Modelo de sistema viable para la infraestructura de las electrolíneas en el Valle de México	128
CIE2025-239	Diseño de un sistema de acondicionamiento de aire para autobús eléctrico	134
CIE2025-240	Impacto de la generación distribuida solar en la demanda del Sistema Eléctrico Nacional	143
CIE2025-242	Aprovechamiento sustentable de los residuos de poliestireno expandido tipo unicel	150
CIE2025-243	Producción de H ₂ por reformación catalítica de glicerol o etanol separando CO ₂	156
CIE2025-245	Innovación en la formación para ingeniería con simulación computacional y manufactura aditiva 3D	161
CIE2025-248	Deciphering reaction pathways in triglyceride hydroprocessing: from stochastic exploration to deterministic optimization via a dual-phase Monte Carlo-Levenberg-Marquardt framework	170
CIE2025-249	Novel correlations for the determination of LiBr-H ₂ O concentration in thermodynamic absorption cycles	178
CIE2025-251	Análisis termohidráulico de reactores nucleares de sal fundida	182
CIE2025-253	Caracterización fisicoquímica y determinación del potencial bioquímico de metano de dos especies de sargazo del Caribe Mexicano	190

CIE2025-255	Conversión biotecnológica de pérdidas y desperdicios alimentarios de una cafetería escolar para el impulso de bioproductos	196
CIE2025-258	Diseño de un sistema modular para el tratamiento de agua con energía solar	202
CIE2025-262	Innovación en biodiésel: cavitación transitoria y estándares ASTM para combustibles sostenibles	209
CIE2025-264	Enfoques secuencial y simultáneo para la síntesis de redes usuarias de agua con integración térmica	216
CIE2025-265	Análisis del impacto de la distribución de temperaturas en el procesamiento hidrotérmico de biomasa utilizando energía solar concentrada	222
CIE2025-266	Pirólisis solar de sargazo para la producción de biofertilizante a base de carbón	228
CIE2025-269	Diseño de plantas de generación de energía usando la norma PSD-1 de ASME	237
CIE2025-275	Diseño y construcción de una trituradora PET para apoyo al centro de acopio de la UAM-Azcapotzalco	244
CIE2025-279	Modelo dinámico de orden fraccional de la producción de xilitol y etanol a partir de residuos agroindustriales en un reactor por lotes	248
CIE2025-280	Análisis térmico de una torre de enfriamiento	255

CIE2025-281	Interacciones entre soluciones basadas en la naturaleza y energía. Un estudio bibliométrico	264
CIE2025-282	Obtención de colorante sensibilizador a partir de cáscara de aguacate para su aprovechamiento en celda solar DSSC	271
CIE2025-285	Potencial del hidrocarbón solar derivado de la biomasa residual como enmendador de suelos y promotor bioenergético	275
CIE2025-287	Obtención de colorante a partir de pétalos de Tagetes erecta L. para su utilización en celdas solares sensibilizadas por colorantes	282
CIE2025-290	Caracterización química, física y energética del biochar producido por la pirólisis de bagazo de caña de azúcar	287
CIE2025-291	El futuro del uso de aire acondicionado en vivienda en la Ciudad de México	293
CIE2025-297	Efecto que tiene la presencia de H ₂ en la reducción de NO con un catalizador estructurado de Pt-Ag	298
CIE2025-298	Degradación fotocatalítica de fenol utilizando catalizadores de Ni/MCM-41	304
CIE2025-301	Industrial waste heat recovery technologies assessment and their applicability in the manufacturing sector from Nuevo León	309
CIE2025-302	Modelos comunitarios de generación distribuida para una transición energética justa en México	315

CIE2025-304	Alternativas de desarrollo energético de Baja California Sur	322
CIE2025-305	Estudio exergético comparativo de un sistema de refrigeración simple y uno de doble cascada	328
CIE2025-306	Desalinización de agua de mar por cogeneración con turbina de gas	336
CIE2025-308	Secado solar de biomasas como etapa de pretratamiento para la industria farmacéutica	342
CIE2025-318	Improvements in restructuring conditions for solar concentration plants based on thermodynamic optimization	348
CIE2025-321	Aspectos importantes en la obtención de diésel renovable usando un enfoque de cohidrotratamiento	356
CIE2025-326	Análisis tecnoeconómico del proceso de cogeneración de biomasas residuales	366
CIE2025-327	Producción de bioenergía y biocombustibles a partir de residuos de café gastado	370
CIE2025-329	Producción de biocarbón por proceso hidrotérmico a condiciones moderadas empleando residuos orgánicos de fruta común en la Ciudad de México	375
CIE2025-330	Construcción y evaluación de un biodigestor anaerobio tipo batch para la producción de biogás	382
CIE2025-332	Reducción sucesiva de superestructura para la síntesis de redes de transmisión de gas natural	390

CIE2025-338	Creencias consumistas vs creencias sustentables	397
CIE2025-355	Characterization and research data of a thermoelectric panel using the seebeck effect with sun energy	402
CIE2025-373	Degradación fotocatalítica de carbamazepina utilizando nanopartículas de ZnO	409
CIE2025-377	Aplicación sustentable en la degradación de contaminantes emergentes: fotocátalisis de nanotubos de TiO ₂	416
CIE2025-380	Esquemas de protección para subestaciones de rectificación para trolebuses	420
CIE2025-401	Hidrotratamiento de eugenol a bioturbosina mediante catalizadores de Ni-Pt/SBA-(Zr ó Ti)	428
CIE2025-402	Obtención de biocombustibles sostenibles a partir de biocrudos: efecto de la mezcla y del sistema catalítico	435



Diseño óptimo de redes usuarias de agua con integración térmica: un caso de estudio de gran escala 2w10u4j

HERNÁN T. CORTÉS-MONROY¹, JUAN M. ZAMORA-MATA²

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Energía, CDMX, 02200, México

²Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, CDMX, 09310, México

Autor de Correspondencia: Juan M. Zamora-Mata (e-mail: jmzm@xanum.uam.mx).

Este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Síntesis, Optimización y Simulación de Procesos (SOS) del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I). El primer autor desea agradecer el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti, México) por la beca otorgada para cursar el Doctorado en Ingeniería de Proceso en el Programa de Posgrado de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco (UAM-A).

RESUMEN El uso eficiente de agua y energía en las industrias de proceso permite reducir costos de operación y la emisión de efluentes contaminantes y gases de efecto invernadero. En este trabajo se aborda un problema de diseño óptimo para una red usuaria de agua con integración térmica, asociada a un caso de estudio con dos fuentes de agua (2w), diez operaciones usuarias de agua a diferentes temperaturas (10u) y cuatro contaminantes (4j). El diseño óptimo se desarrolla a partir de una topología de red asociada a un diseño base propuesto en la literatura. Se desarrolla un modelo de optimización, cuya función objetivo considera los costos de operación debidos al consumo de agua y energía, y los costos de inversión de los equipos de intercambio de calor. El modelo se resuelve utilizando una estrategia con múltiples arranques pseudo aleatorios, combinados con el uso de un código de optimización local; posibilitando así la detección de diseños óptimos locales alternativos que presentan diferentes características y costo total anual (CTA). Se obtuvieron cinco diferentes diseños de red; el mejor de los cuales presenta un menor CTA que el diseño base de la literatura.

PALABRAS CLAVE: Uso eficiente de agua, Uso eficiente de energía, Diseño óptimo, Redes integradas de agua y energía.

1. INTRODUCCIÓN

En las industrias de proceso es de suma importancia el uso eficiente de los materias primas e insumos, ya que esto puede permitir desarrollar procesos sustentables y reducir el consumo de recursos, costos de operación y el impacto ambiental. En este contexto, el diseño óptimo de los sistemas

en las industrias de proceso que utilizan agua y energía cobra relevancia. Para ello es importante considerar la forma en la que se distribuye, utiliza y reutiliza o se recupera el agua y la energía, respectivamente, para hacer un uso eficiente de estos recursos. Esto se puede lograr considerando estrategias de reúso de agua y de recuperación de calor. A este tipo de sistemas que utilizan eficientemente el agua y la energía se les conoce como redes usuarias de agua con integración térmica, cuyo objetivo principal consiste en satisfacer la demanda de agua y energía en las operaciones usuarias de agua que integran un sistema, tomando en cuenta las especificaciones nominales de diseño en cada operación, como son la carga másica transferida al agua de uno o varios contaminantes y las concentraciones límite de estos contaminantes en las corrientes de entrada y salida, así como la temperatura de operación; todo ello, al menor costo total anual (CTA) de la red. Para diseñar este tipo de sistemas se han desarrollado diversas metodologías de síntesis, tanto heurísticas como de programación matemática [1]. Sin embargo, las metodologías heurísticas presentan limitaciones al abordar problemas de gran escala y considerar múltiples contaminantes, además de que no garantizan obtener diseños óptimos. Mientras que las metodologías de programación matemática están basadas en la optimización de superestructuras, en las cuales se consideran muchas posibilidades de reúso de agua y de recuperación de energía, que derivan en modelos no lineales de optimización que son complejos y difíciles de resolver, por lo que en algunos casos las soluciones obtenidas pueden ser soluciones óptimas locales de mala calidad (con un CTA elevado) o soluciones sub-óptimas, en particular, para problemas de gran escala, por lo que considerar una etapa posterior de optimización de los diseños de red obtenidos





mediante alguna de las metodologías de síntesis, puede permitir mejorar las soluciones obtenidas y reducir el CTA de dichos diseños. En este trabajo se aborda el diseño óptimo de una red usuaria de agua con integración térmica asociado a un caso de estudio de gran escala, para el cual ya se cuenta con un diseño base de red obtenido mediante una metodología de síntesis de programación matemática. A partir de este diseño de red se desarrollará un modelo de programación no lineal (PNL) y se resolverá con una estrategia híbrida de solución, para explorar en la medida de lo posible el espacio de solución y, determinar las condiciones óptimas de operación que minimicen el CTA de la red.

2. METODOLOGÍA

La metodología aquí presentada se aplicará a un caso de estudio que considera dos fuentes de agua (2w), diez operaciones usuarias de agua (10u) y cuatro contaminantes (4j), definido como Caso de Estudio 2w10u4j [1], el cual se considera como un problema de gran escala.

2.1. Datos y diseño base del caso de estudio

En el Caso de Estudio 2w10u4j, la fuente de agua 1 es agua dulce, es decir, libre de contaminantes, mientras que la fuente de agua 2 presenta una concentración de los contaminantes A, B, C y D de 10 ppm. Estas dos fuentes externas de agua suministran a 10 operaciones usuarias de agua que operan a diferente temperatura y en las que se considera la calidad del agua en sus corrientes de entrada y salida, respecto a los contaminantes, A, B, C y D. En la Tabla 1 se muestran los datos relacionados con los costos unitarios de las fuentes externas de agua, servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, así como los costos de capital de los equipos de intercambio de calor (calentadores, recuperadores y enfriadores). Los datos nominales de diseño de las operaciones usuarias de agua se presentan en la Tabla 2.

Para este caso de estudio, ya se cuenta con un diseño base [2] (Figura 1) de una red usuaria de agua con integración térmica, el cual fue obtenido mediante una metodología de síntesis de programación matemática, desarrollados por Hong y col., (2018) [2]. Este diseño base de red presenta un CTA reportado, utilizando la aproximación de Chen [3] para la media logarítmica de las diferencias de temperatura, de 3,123,261.8 \$/año, un consumo total de agua de 165.13 kg/s, un consumo de 6,935.45 kW de servicios auxiliares de calentamiento en un calentador, 1,890.09 kW de servicios auxiliares de enfriamiento en un enfriador y un área total de transferencia de calor de 3,669.77 m². En este diseño base de red se recuperan 20,355.9 kW en cuatro recuperadores de

calor y se cuenta con 46 interconexiones de divisores a mezcladores.

TABLA 1. Datos de costo y operación para el Caso de Estudio 2w10u4j [1].

Símb.	Descripción	Valor	Unidades
C_{w1}	Costo unitario fuente de agua 1, $w1$	0.5	\$/t
—	Temp. de $w1$	20	°C
	Costo unitario fuente de agua 2, $w2$	0.1	\$/t
C_{w2}	Temp. de $w2$	30	°C
—	Costo unitario serv. aux. de calentamiento, hu (vap. sat.)	120	\$(/kW año)
OC_{hu}	Temp. inicial de hu	120	°C
—	Temp. final de hu	120	°C
	Costo unitario serv. aux. de enfriamiento, cu (agua de enf.)	30	\$(/kW año)
OC_{cu}	Temp. inicial de cu	10	°C
—	Temp. final de cu	20	°C
h_i	Coef. indiv. de transf. de calor para agua, hu y cu	1	kW/(m ² °C)
C_p	Capacidad calorífica específica del agua	4.2	kJ/(kg °C)
CC	Costo de cap. de los equipos de transf. de calor = 8,000 + 1,200[Área(m ²)]		\$/año
	Temp. final del efluente $e1$	30	°C
T_{e1}			
H	Horas anuales de op. de la planta	8,000	h/año

2.2. Modelo de optimización

A partir de la topología del diseño base de red mostrado en la Figura 1, se desarrolla un modelo de PNL. Para ello, se establecen balances de materia para el agua y los contaminantes entorno a las 10 operaciones usuarias de agua, los nodos de mezcla de corrientes de agua presentes antes de cada operación usuaria, del calentador, de cada recuperador de calor y del enfriador, respectivamente. Adicionalmente se establecen balances de energía en torno al calentador, a los cuatro equipos de recuperación de calor y al enfriador, así como las respectivas ecuaciones de diseño de los equipos de intercambio de calor; como son: las diferencias de temperatura en el extremo frío y caliente de cada equipo, la media logarítmica de las diferencias de temperatura, utilizando la aproximación de Chen [3], y el área de transferencia de calor en el calentador, en los equipos de recuperación de calor y en el enfriador, respectivamente. También se establecen cotas superiores e inferiores para todas las variables de decisión. La función objetivo (1) del modelo de PNL considera los costos de operación de las fuentes de agua, de los servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, además de los costos de capital del calentador, de los cuatro recuperadores de calor y del enfriador, en función de sus áreas de intercambio de calor.





TABLA 2. Datos de las operaciones usuarias de agua para el Caso de Estudio 2w10u4j [1, 4].

Op.	Conta- minante	Carga másica (g/h)	Concn. máx. (ppm)		Temp op. (°C)
			Entrada	Salida	
u1	A	616,776	200	25,000	70
	B	484,965	500	20,000	
	C	706,308	100	28,500	
	D	5,682,795	1,500	230,000	
u2	A	313,497	350	8,000	60
	B	245,880	3,000	9,000	
	C	966,308.4	500	24,080	
	D	106,548	400	3,000	
u3	A	123,480	350	3,500	90
	B	80,360	450	2,500	
	C	52,920	150	1,500	
	D	39,200	500	1,500	
u4	A	56,800	800	15,000	80
	B	17,400	650	5,000	
	C	1,000	450	700	
	D	4,800	300	1,500	
u5	A	2,744	1,300	2,000	70
	B	19,600	2,000	7,000	
	C	27,440	2,000	9,000	
	D	23,520	4,000	10,000	
u6	A	1,237,500	3,000	12,000	100
	B	1,100,000	2,000	10,000	
	C	1,086,250	100	8,000	
	D	27,500	0	200	
u7	A	450,988	450	2,000	40
	B	872,880	0	3,000	
	C	218,220	250	1,000	
	D	3,302,396	650	12,000	
u8	A	79,763.5	100	3,450	80
	B	89,287.5	250	4,000	
	C	11,905	200	700	
	D	153,574.5	550	7,000	
u9	A	55,624	150	1,000	50
	B	35,992	450	1,000	
	C	65,440	3,000	4,000	
	D	0	100	100	
u10	A	400	0	100	60
	B	400	0	100	
	C	400	0	100	
	D	400	0	100	

Modelo

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & H \cdot (C_{w1} \cdot f_{w1} + C_{w2} \cdot f_{w2}) + OC_{hu} \cdot q_{hu} + OC_{cu} \cdot q_{cu} \\ & + 8000_{hr1} + 1200 \cdot A_{hr1}^{0.6} + 8000_{hr2} + 1200 \cdot A_{hr2}^{0.6} \\ & + 8000_{hr3} + 1200 \cdot A_{hr3}^{0.6} + 8000_{hr4} + 1200 \cdot A_{hr4}^{0.6} \\ & + 8000_{hu} + 1200 \cdot A_{hu}^{0.6} + 8000_{cu} + 1200 \cdot A_{cu}^{0.6} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

- Balances de materia para el agua y los contaminantes.
- Balances de energía y ecuaciones de diseño de los equipos de intercambio de calor:

$$q_{hu} = f_{hu} \cdot \Delta \hat{H} f_{g_{hu}} \quad (2)$$

$$q_{cu} = f_{cu} \cdot C_{p_{cu}} \cdot (tcu_{out} - tcu_{in}) \quad (3)$$

$$q_{hr1} = f_{c_{hr1}} \cdot \hat{C}_{p_{c_{hr1}}} \cdot (tcout_{hr1} - tcin_{hr1}) \quad (4)$$

$$q_{hr1} = f_{h_{hr1}} \cdot \hat{C}_{p_{h_{hr1}}} \cdot (thin_{hr1} - thout_{hr1}) \quad (5)$$

$$q_{hr2} = f_{c_{hr2}} \cdot \hat{C}_{p_{c_{hr2}}} \cdot (tcout_{hr2} - tcin_{hr2}) \quad (6)$$

$$q_{hr2} = f_{h_{hr2}} \cdot \hat{C}_{p_{h_{hr2}}} \cdot (thin_{hr2} - thout_{hr2}) \quad (7)$$

$$q_{hr3} = f_{c_{hr3}} \cdot \hat{C}_{p_{c_{hr3}}} \cdot (tcout_{hr3} - tcin_{hr3}) \quad (8)$$

$$q_{hr3} = f_{h_{hr3}} \cdot \hat{C}_{p_{h_{hr3}}} \cdot (thin_{hr3} - thout_{hr3}) \quad (9)$$

$$q_{hr4} = f_{c_{hr4}} \cdot \hat{C}_{p_{c_{hr4}}} \cdot (tcout_{hr4} - tcin_{hr4}) \quad (10)$$

$$q_{hr4} = f_{h_{hr4}} \cdot \hat{C}_{p_{h_{hr4}}} \cdot (thin_{hr4} - thout_{hr4}) \quad (11)$$

$$\Delta T_i = \left[(dth_i \cdot dtc_i) \left(\frac{dth_i + dtc_i}{2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

$$A_i = \frac{q_i}{U_i \cdot \Delta T_i} \quad (13)$$

- Cotas superiores e inferiores para todas las variables de decisión.

Donde el sub-índice i puede ser, hu , cu , $hr1$, $hr2$, $hr3$ o $hr4$, denotando al calentador, enfriador, recuperador 1, recuperador 2, recuperador 3 y recuperador 4, respectivamente. Mientras que, el subíndice c y h hacen referencia a la corriente fría y caliente que participa en el intercambio de calor en un equipo, respectivamente.

Este modelo cuenta con 723 variables de decisión y 304 ecuaciones en total.

2.3. Estrategia de solución

Para resolver el modelo de PNL desarrollado y explorar en la medida de lo posible el espacio de solución del modelo en busca de soluciones óptimas locales, se implementó y adaptó una estrategia de multi-arranque estocástico en dos fases, desarrollada originalmente por Núñez-Serna y Zamora, (2016) [5] para la optimización de redes de intercambio de calor con una topología de red pre-establecida.

Esta estrategia consiste en definir un número total de iteraciones (N). En cada iteración se inicializan de forma pseudo-aleatoria cada variable de decisión entre los valores de su cota superior e inferior, generando un punto de inicio en el espacio de solución del modelo. Se incrementa el contador i . Posteriormente, a partir del punto de inicio generado de forma pseudo-aleatoria se resuelve el modelo de optimización. Para ello se utiliza el resolutor comercial CONOPT 3 [6]. Una vez resuelto el modelo, si se obtiene



una solución óptima local ($fobj_i, x^i$), si el valor de $fobj_i < fobj^*$ se almacena como la mejor solución y se sigue con la siguiente iteración. Este proceso se repite hasta que se alcance el número total de iteraciones y al final se analizan los resultados obtenidos. Este algoritmo, así como el modelo de optimización se implementaron en el ambiente de modelado algebraico de GAMS 21.4. El diagrama de flujo de la estrategia de solución se resume en la Figura 2.

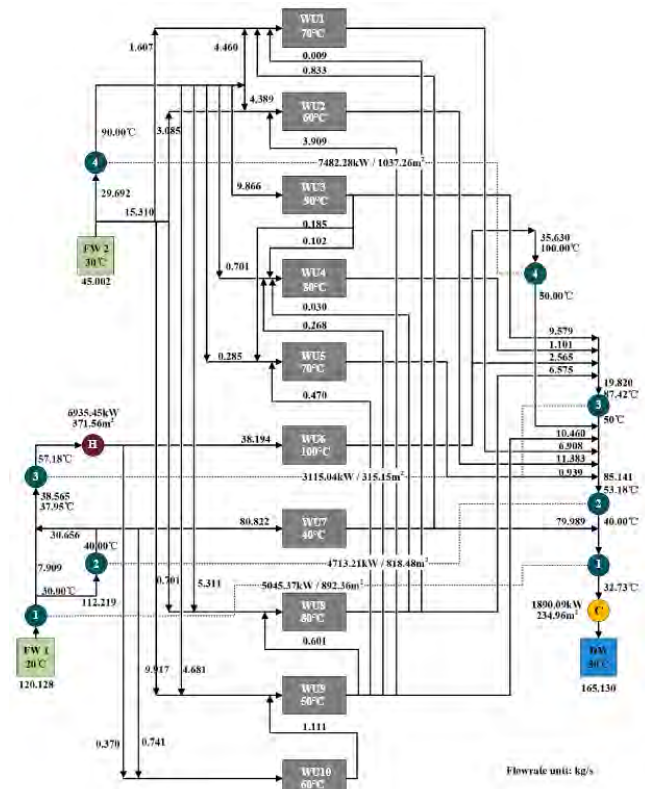


FIGURA 2. Estrategia de multi-arranque estocástico en dos fases [5].

TABLA 3. Soluciones óptimas locales diferentes obtenidas en este trabajo

It	Icnx (h-r-c)*	Cons. hu (kW)	Cons. cu (kW)	Área total (m ²)	Costo de Cap. (\$/año)	CTA (\$/año)
**	46(1-4-1)	6,935.45	1,890.09	3,669.77	374,859.20	3,123,261.80
1	45(1-4-1)	6,935.45	1,890.09	3,642.02	372,191.58	3,120,594.21
10	41(1-3-1)	8,404.61	3,359.24	3,307.94	313,523.93	3,282,304.98
33	42(1-3-1)	8,825.54	3,780.17	3,464.40	317,674.05	3,349,589.45
2	40(1-2-1)	9,718.33	4,672.97	3,064.68	285,577.98	3,451,412.82
3	40(1-2-1)	9,718.33	4,672.97	3,367.72	297,959.23	3,463,794.08

*Interconexiones de divisores a mezcladores (calentador-recuperadores-enfriador).

**Diseño base de red (Figura 1)

FIGURA 1. Diseño base de red desarrollado por Hong y col., (2018), con un CTA de 3,123,261.8 \$/año, 46 interconexiones, un calentador, cuatro recuperadores de calor y un enfriador.

3. RESULTADOS

Se establecieron 1,000 iteraciones para la estrategia de solución, de las cuales se converge en 108 veces a soluciones óptimas locales. Al filtrar y comparar dichas soluciones se identificaron cinco soluciones óptimas locales con características diferentes como: el número de interconexiones, el número de recuperadores de calor, el consumo de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, el área de intercambio de calor, el costo de capital de los equipos de intercambio de calor y el CTA de la red, como se muestra en la Tabla 3.

De acuerdo con la Tabla 3, las soluciones obtenidas se pueden clasificar en cinco niveles del CTA de la red, desde el diseño de red con menor CTA = 3,120,594.21 \$/año (-2,667.59 \$/año o -0.08% con respecto al diseño base de red, Figura 1) hasta el diseño de red con el mayor CTA = 3,463,794.08 \$/año (340,532.28 \$/año o 10.9% más con respecto al diseño base, Figura 1). El diseño obtenido en la primera iteración (Figura 3) corresponde al diseño de menor CTA, el cual presenta el mismo consumo total de agua, de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento comparado con el diseño base de red de la Figura 1. Sin embargo, cuenta con 45 interconexiones, una interconexión menos con respecto al diseño base (eliminando la interconexión que va de la corriente fría del recuperador 1 hacia la corriente fría del recuperador 3) y con 27.75 m² menos en el área total de intercambio de calor, debido a una redistribución del área de intercambio de calor en los recuperadores 2, 3 y 4, de ahí la diferencia en el CTA.

Además, a pesar de la redistribución de cargas térmicas en los recuperadores de calor 2 y 3, el nivel de recuperación de calor se mantiene en 20,355.9 kW

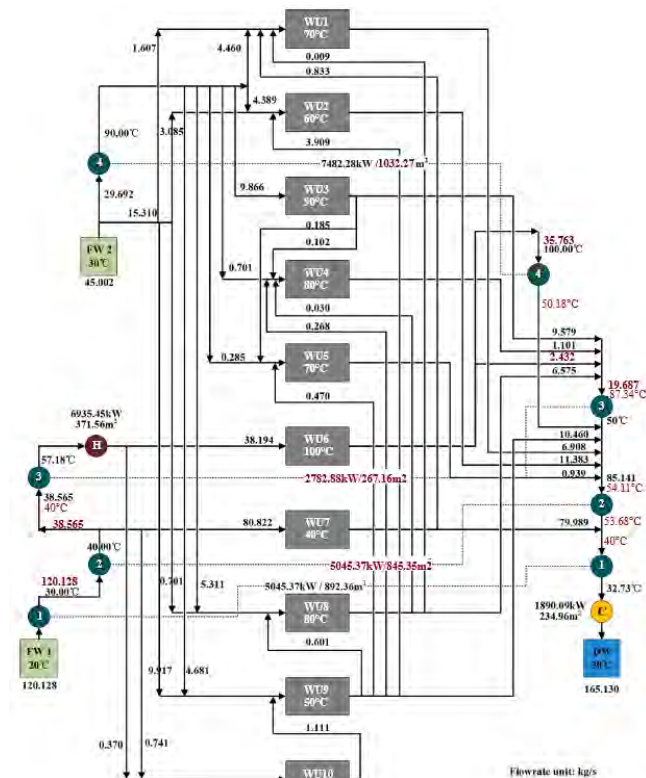


FIGURA 3. Diseño óptimo de red, obtenido en la iteración 1, con un CTA de 3,120,594.21 \$/año, 45 interconexiones, un calentador, cuatro recuperadores de calor y un enfriador.

Mientras que la segunda mejor solución óptima (Figura 4), obtenida en la iteración 10, tiene un CTA = 3,282,304.98 \$/año (+5.09% en el CTA respecto al diseño base de red, Figura 1), un consumo de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento que se incrementa en un 21.18% y 77.73%, respectivamente, y un calor recuperado que disminuye de 20,355.9 kW a 18,888.23 kW, es decir -7.21% con respecto al diseño base de red. El aumento en el consumo de servicios auxiliares incrementa las áreas de intercambio de calor en un 11.91% en el calentador y un 65.34% en el enfriador, con respecto al diseño base de red. Este diseño es menos eficiente energéticamente, pero el número de interconexiones y el número de equipos de recuperación de calor se reduce de 46 a 41 y de 4 a 3, respectivamente, como se muestra en la Figura 4, en donde la carga térmica y el área de transferencia de calor del recuperador 1 se integra en el recuperador 2. En este diseño de red hay un incremento en el consumo de energía y una

redistribución de cargas térmicas y áreas de intercambio de calor en un número menor de equipos. Por lo que, al aumentar la carga térmica y disminuir el número de equipos, el costo de operación y de capital aumentan.

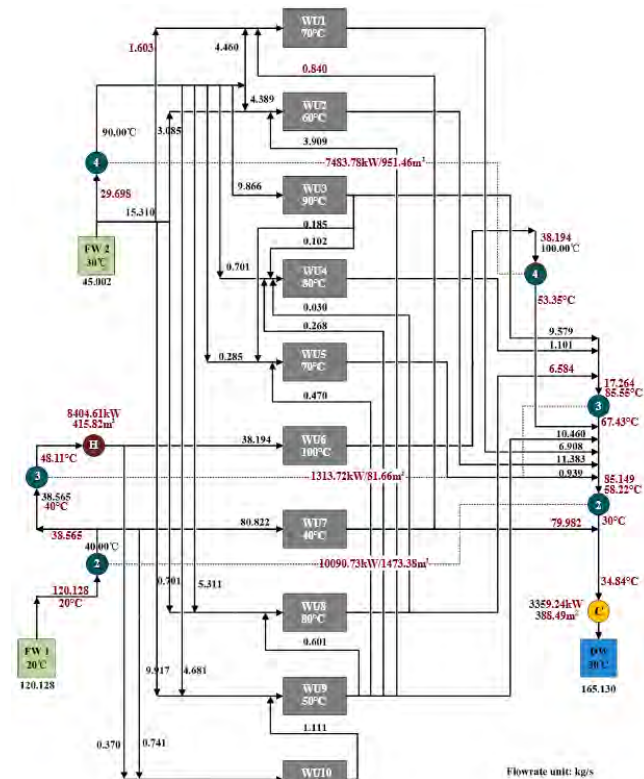


FIGURA 4. Diseño óptimo de red, obtenido en la iteración 10, con un CTA de 3,282,304.98 \$/año, 41 interconexiones, un calentador, tres recuperadores de calor y un enfriador.

En la Figura 5 se muestra uno de los dos diseños óptimos locales de red que presentan el menor número de interconexiones y número de equipos, el cual está asociado a la iteración 3. El diseño de la Fig. 5 presenta un CTA = 3,463,794.08 \$/año (+10.9% con respecto al diseño base), 40 interconexiones, un calentador de 9,718.33 kW, dos recuperadores de calor que en total recuperan 17,573.01 kW y un enfriador de 4,672.97 kW. Este diseño es el menos eficiente energéticamente, ya que el calor recuperado en el diseño de red de la Figura 5 se reduce en un 13.67%, en comparación al calor recuperado en el diseño base de red de la Figura 1. Cabe destacar que, en el diseño de red de la Figura 5, el recuperador 2 se integra al recuperador 1. Lo que permite recuperar más energía en un mismo equipo de intercambio de calor, prescindiendo del recuperador de calor 3. Para compensar la reducción del 13.67% en la recuperación de calor con respecto al diseño base de red, se

incrementa considerablemente el consumo de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento en un 40.12% y 147.23%, respectivamente.

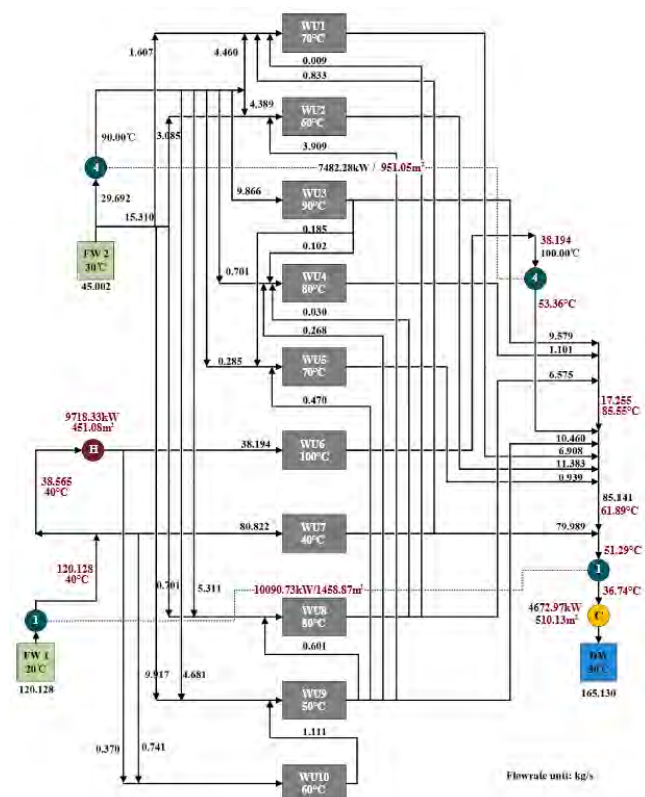


FIGURA 5. Diseño óptimo de red, obtenido en la iteración 3, con un CTA de 3,463,794.08 \$/año, 40 interconexiones, un calentador, dos recuperadores de calor y un enfriador.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se muestra como abordar el diseño óptimo de una red usuaria de agua con integración térmica para el caso de estudio 2w10u4j; a partir de un diseño base de red, se busca reducir el CTA de la red y de ser posible, simplificar el diseño de red. Se muestran diferentes diseños de red obtenidos a partir de una topología de red fija. Los diseños obtenidos muestran que, a medida que se reduce la cantidad de energía recuperada, es necesario suministrar hasta un 40.12% de calor adicional con servicios auxiliares de calentamiento, incrementando hasta en un 147.23% la energía residual a ser removida mediante servicios auxiliares de enfriamiento. Además, se muestra que, para este caso de estudio particular, el diseño base de red corresponde a una solución sub-óptima, ya que la optimización permitió reevaluar la distribución de agua, de temperaturas, cargas térmicas y áreas de transferencia de calor para reducir el CTA de la red.

5. CONCLUSIONES

Se abordó el diseño óptimo de una red usuaria de agua con integración térmica de gran escala, a partir de una topología de red reportada en un diseño de la literatura. La metodología utilizada permitió desarrollar cinco diseños alternativos. El mejor diseño obtenido reduce en 2,667.59 \$/año el CTA, manteniendo los mismos consumos de agua y servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, pero eliminando una interconexión de la red y reduciendo también el área total de intercambio de calor en 27.75 m². Estos cambios en el diseño de red son posibles debido a redistribuciones de flujos máscicos de agua en corrientes intermedias, y áreas y cargas térmicas en los equipos de recuperación de calor. Finalmente, los resultados de este trabajo dan evidencia de la importancia de incorporar en las metodologías de síntesis una última etapa de optimización, para explorar el espacio de solución que expande la topología del diseño de red sintetizado.

REFERENCIAS

- [1]. Ibric N, Ahmetovic E, y Kravanja Z, *Mathematical programming synthesis of non-isothermal water networks by using a compact/reduced superstructure and an MINLP model*. Clean Technologies and Environmental Policy 18:1779-1813 (2016). 10.1007/s10098-016-1152-9.
- [2]. Hong X, Liao Z, Sun J, Jiang B, Wang J, y Yang Y, *Energy and Water Management for Industrial Large-Scale Water Networks: A Systematic Simultaneous Optimization Approach*. ACS Sustainable Chemistry and Engineering 6:2269-2282 (2018). 10.1021/acssuschemeng.7b03740.
- [3]. Chen JJJ, *Logarithmic mean: Chen's approximation or explicit solution?* Computers and Chemical Engineering 120:1-3 (2019). 10.1002/j.compchemeng.2018.10.002.
- [4]. Leewongtanawit B, y Kim JK, *Synthesis and optimization of the Hat-integrated multiple-contaminant water systems*, Chemical Engineering and Processing, 47:670-694 (2008). 10.1016/j.cep.2006.12.018.
- [5]. Núñez-Serna RI y Zamora JM, *NLP model and stochastic multi-start optimization approach for heat exchanger networks*, Applied Thermal Engineering 94:458-471 (2016). 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.128.
- [6]. Drud AS, *CONOPT – a large-scale GRG code*. ORSA journal on Computing 6:207-216 (1994). 10.1287/ijoc.6.2.207.



Techos verdes y confort: estudio en ocho ciudades mexicanas

ALFREDO TOBIAS SALAS^{1,*}, M. AZUCENA ESCOBEDO IZQUIERDO¹, SERGIO QUEZADA GARCÍA¹

¹Departamento de Energía Eléctrica y Sostenibilidad, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, 04510, México

Autor de Correspondencia: Alfredo Tobias Salas (e-mail: tobiassalasalfredo@gmail.com)

RESUMEN Reducir el consumo de energía manteniendo el confort térmico es un objetivo esencial para lograr edificios resilientes y confortables ante el cambio climático. Una estrategia sostenible para lograr este objetivo es la implementación de técnicas pasivas de refrigeración en lugares con climas cálidos; un ejemplo de estas técnicas pasivas son los techos verdes; los cuales, ofrecen aislamiento térmico, enfriamiento por evaporación y protección solar. Este estudio evaluó el rendimiento térmico y la sensación de confort, mediante el voto medio estimado, en una vivienda en Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Tampico, Guanajuato, Querétaro, Pachuca y Cancún. El desempeño térmico y el consumo de energía destinado a la refrigeración con la implementación del techo verde fue comparado con el uso de un techo convencional. Los resultados muestran que el techo verde contribuye significativamente a disminuir la temperatura interior, particularmente en el dormitorio situado cerca del techo expuesto al medio ambiente. Su implementación mejora la sensación de confort y, en ciertas condiciones, puede eliminar la necesidad de utilizar aire acondicionado.

PALABRAS CLAVE: Voto medio estimado, refrigeración pasiva, simulación energética en edificios.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de las emisiones de carbono es uno de los principales factores del cambio climático [1]. El consumo de energía en los edificios contribuye de forma significativa a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). En 2019, el sector de los edificios fue responsable del 21% de las emisiones de GEI; de las cuales, el 57% fueron emisiones indirectas de CO₂ procedentes de la generación de electricidad y calor para los edificios [2]. Además, el cambio climático afectará al consumo de energía en los edificios

provocando un incremento en el consumo de energía destinada para la calefacción y la refrigeración de los espacios [3].

Para reducir las emisiones de GEI existe una solución sostenible que se basa en incrementar el espacio verde en las ciudades [4]. Sin embargo, esta estrategia enfrenta la problemática de que el espacio disponible en zonas con alta densidad poblacional para incorporar vegetación es limitado.

Una alternativa para superar esta limitante es incrementar la infraestructura verde en las zonas urbanas mediante la implementación de techos verdes; los cuales, consisten en un conjunto de capas que se colocan sobre el techo convencional. Un techo verde está compuesto, básicamente, por una capa vegetal y una capa de sustrato que actúa como medio de crecimiento para la vegetación. Los techos verdes tienen muchos beneficios como la absorción de contaminantes atmosféricos [5], la conservación de la biodiversidad urbana [6], la retención de aguas pluviales [7], la reducción del efecto de la isla de calor en las ciudades [8], la reducción del ruido [9] y la reducción de la temperatura interior en los edificios [10].

ANTECEDENTES

En México se han realizado estudios sobre los beneficios que tiene la implementación de un techo verde; Ávila-Hernández et, al. [11] evaluaron térmica y energéticamente durante un año la implementación de un techo verde en una vivienda utilizando la norma NOM-020-ENER-2011. Se compararon un techo convencional y uno verde en Hermosillo mediante simulaciones en *EnergyPlus*. Sus resultados mostraron que, el techo verde redujo la temperatura interior de la vivienda hasta en 4.7°C. Su análisis económico indicó un periodo mínimo de recuperación de la inversión de 8.8 años.

Polo-Labarríos et, al. [12] compararon el comportamiento térmico de un techo verde con el de un techo convencional en un clima cálido, utilizando un modelo matemático transitorio de transferencia de calor. Sus resultados



mostraron que el techo verde reduce la temperatura interior hasta en 12°C, en comparación con el techo convencional.

La efectividad de los techos verdes al reducir la temperatura interior se ha confirmado por los anteriores estudios. Sin embargo, estos estudios no consideraron el efecto que tienen los techos verdes sobre el confort térmico en los ocupantes de un edificio. La temperatura, la humedad, la velocidad del viento, la radiación y la vestimenta influyen en el confort térmico. Debido a esto, la implementación de los techos verdes debe considerar el efecto que tienen sobre el confort térmico de los ocupantes.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento térmico de un techo verde en un modelo de una vivienda, ubicado en ocho ciudades de México, estas son: Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Tampico, Guanajuato, Querétaro, Pachuca y Cancún. Se toma como referencia dos dormitorios del modelo de la vivienda, y se compara la temperatura interior y el consumo energético destinado a la refrigeración, utilizando tanto un techo convencional como un techo verde. Se emplea el índice voto medio estimado (PMV) para evaluar el nivel de confort térmico en los espacios analizados.

1. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio consiste en la recolección de datos climáticos de un año típico en formato *epw* para ocho ciudades mexicanas, estas fueron: Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Tampico, Guanajuato, Querétaro, Pachuca y Cancún. Se elabora un modelo tridimensional de una vivienda mediante la extensión *OpenStudio* de *SketchUp*; el cual, se exporta a *EnergyPlus* para la asignación de las propiedades térmicas de los materiales y de las características del sistema del techo verde.

Las simulaciones se realizan el día 15 de cada mes durante un año, utilizando inicialmente el modelo con un techo convencional (techo de concreto), con el fin de obtener la temperatura interior del espacio y el nivel de confort térmico, mediante el voto medio estimado, un indicador ampliamente utilizado en estudios de confort térmico. Posteriormente, se repiten las simulaciones incorporando un techo verde, determinando nuevamente la temperatura interior y el nivel de confort térmico en los dormitorios estudiados. En los casos en los que no se alcanza al menos un 60% de confort térmico, se lleva a cabo una evaluación comparativa del consumo energético de un sistema de aire acondicionado entre ambos tipos de techos. Finalmente, se calcula la reducción en el consumo de energía y de las emisiones de CO₂ equivalente, utilizando un factor de emisión de 0.435 tCO₂e/MWh [13], correspondiente al sistema eléctrico nacional mexicano.

2.1. Casos de estudio

El modelo de la vivienda analizado en este estudio cuenta con una fachada principal orientada hacia el sur, con una superficie total de 78.8 m² y un volumen de 197.0 m³. El análisis se centra en los dormitorios 1 y 2; los cuales, se muestra en la Figura 1, así como la distribución general de la vivienda. Las superficies colindantes con otras casas contiguas se consideran adiabáticas, como se muestra en la Figura 2.

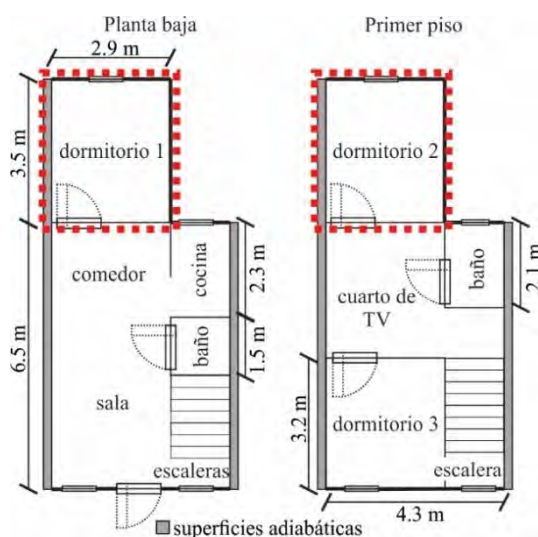


FIGURA 1. Distribución del modelo de vivienda y localización de los dormitorios analizados.

En Tabla 1 se muestran las propiedades térmicas de las envolventes convencionales: conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calor específico (C_p).

Mientras que las características del techo verde se muestran en la Tabla 2. El índice de área foliar (LAI) es de 5 m²/m² lo que indica una cobertura vegetal densa.

La temperatura de confort (*set point*) para la simulación del aire acondicionado es de 23°C, considerando un sistema ideal. El cálculo del confort térmico, utilizando el voto medio estimado, se realiza asumiendo una velocidad del aire de 0.15 m/s, una persona emitiendo calor a 150 W y un nivel de vestimenta equivalente a 0.5 clo, este factor considera el aumento de área superficial por la ropa y se utiliza para calcular la transferencia de calor entre el cuerpo humano y el entorno, está relacionado con el aislamiento térmico de la vestimenta. El voto medio estimado utiliza las variables como la temperatura del bulbo seco, la velocidad del aire, la humedad relativa, la temperatura radiante media, la vestimenta de los ocupantes y la generación de calor de éstos. El PMV, predice el valor medio de los votos emitidos por un

grupo numeroso de personas. Tiene una escala de 7 niveles de -3 a +3 (muy frío, frío, fresco, neutro, ligeramente caliente, caliente y muy caliente). La zona donde el mayor número de personas presentan una sensación de confort térmico es entre -0.5 a 0.5.

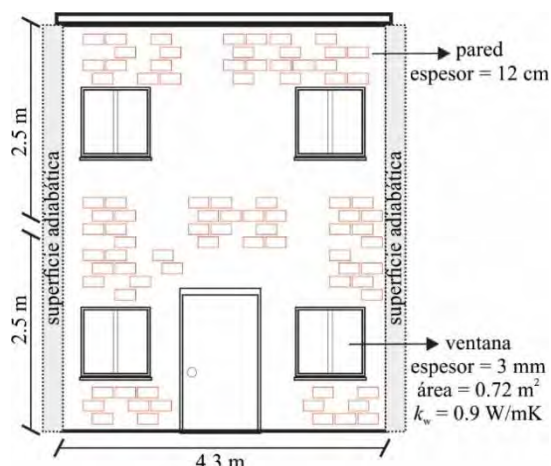


FIGURA 2. Fachada y dimensiones del modelo de vivienda.

Tabla 1. Propiedades térmicas de la envolvente del modelo de la vivienda.

Envolvente	Material	k (W/m K)	ρ (kg/m³)	C_p (J/kg K)
Pared	Ladrillo	0.85	15000	840
Techo convencional	Concreto	1.95	2240	900

Tabla 2. Parámetros del techo verde.

Capa	Parámetro	Valor
Plantas	Altura	0.2 m
	LAI	5 m²/m²
	Reflectividad	0.22
	Emisividad	0.95
	Resistencia estomatal mínima	180 s/m
Sustrato	Espesor	0.1 m
	Conductividad	0.35 W/m K
	Densidad	1100 kg/m³
	Calor específico	1200 J/kg K

3. RESULTADOS

En el dormitorio 1, la implementación del techo verde no muestra un impacto significativo sobre la temperatura mínima para las 8 ciudades consideradas en este estudio (ver Figura 3).



FIGURA 3. Temperatura mínima en el dormitorio 1.

Sin embargo, se observa una reducción en la temperatura máxima de hasta 2.5 °C, particularmente en la ciudad de Mexicali (Figura 4).

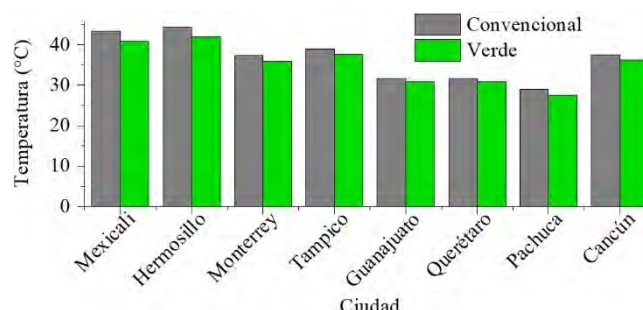


FIGURA 4. Temperatura máxima en el dormitorio 1.

En cuanto a la temperatura promedio del dormitorio 1, las variaciones registradas entre el techo convencional y el techo verde no son considerablemente significativas en los casos estudiados (Figura 5).

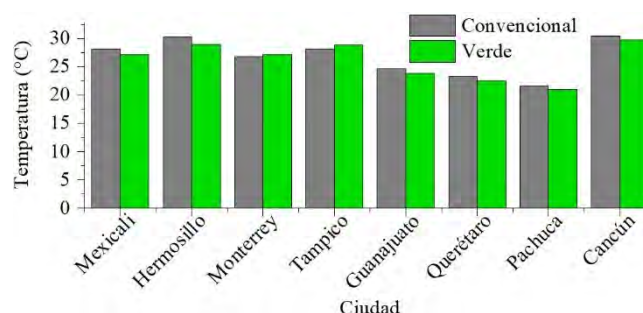


FIGURA 5. Temperatura media en el dormitorio 1.

En el dormitorio 2, el efecto del techo verde es más notorio. En la ciudad de Mexicali se presenta el mayor aumento de la temperatura mínima en el dormitorio 2 (Figura 6), alcanzando los 4°C. Este incremento contribuye a mejorar el confort térmico, ya que en Mexicali las noches pueden ser frías especialmente durante el invierno. Al elevar la temperatura mínima interior, se reduce la sensación de

frío, lo que permite acercarse a condiciones térmicas más confortables.

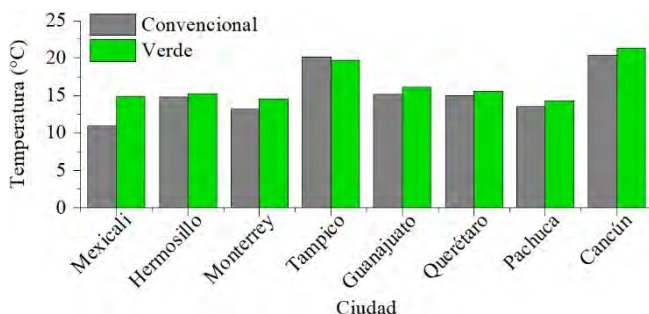


FIGURA 6. Temperatura mínima en el dormitorio 2.

En Mexicali se observa la mayor disminución de la temperatura máxima en el dormitorio 2, con una reducción de hasta 10.7°C (Figura 7). Al disminuir la temperatura máxima en el dormitorio 2, el techo verde favorece una reducción a la sensación de calor, acercando las condiciones al confort térmico.

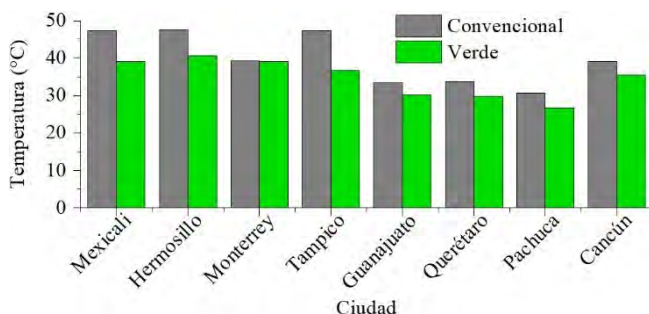


FIGURA 7. Temperatura máxima en el dormitorio 2.

La implementación del techo verde contribuye a la reducción de la temperatura promedio en el interior del dormitorio 2 en todos los casos estudiados (Figura 8). La mayor disminución se observa en la ciudad de Tampico, donde la temperatura promedio se redujo hasta en 12 °C. Este efecto se debe a la capacidad del techo verde para elevar la temperatura mínima y disminuir la máxima, lo que reduce la oscilación térmica al interior de los dormitorios. Esta estabilidad térmica favorece condiciones más confortables dentro del dormitorio 2. Los resultados obtenidos concuerdan con otras investigaciones, que afirma el beneficio de los techos verdes a reducir las variaciones de la temperatura ayudando a la regulación térmica de los espacios [14].

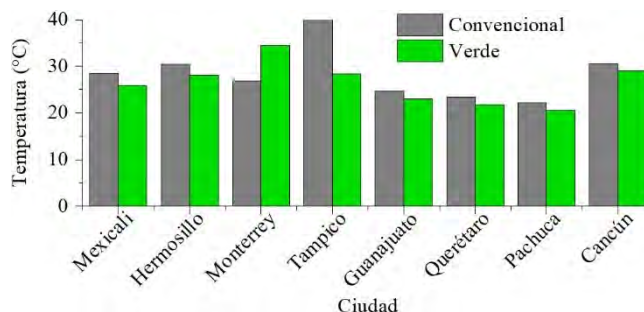


FIGURA 8. Temperatura promedio en el dormitorio 2.

En las Figuras 9 y 10 se muestra el porcentaje de horas anuales de confort térmico utilizando el voto medio estimado en los dormitorios 1 y 2, respectivamente, tanto para el techo convencional como para el techo verde. En el dormitorio 1, el techo verde incrementó la sensación de confort en mayor medida en la ciudad de Mexicali, de 18.4% a 33% (Figura 9). El porcentaje más bajo de horas anuales con confort térmico se presenta en la ciudad de Monterrey con la utilización de un techo convencional, este valor fue de 12.1% (Figura 9).

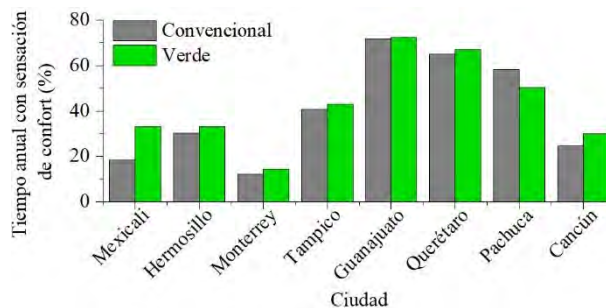


FIGURA 9. Porcentaje de tiempo de confort en el dormitorio 1.

En el dormitorio 2, se observa el mayor incremento en el porcentaje anual de horas de confort térmico para el caso de la ciudad de Mexicali, pasando de 16.3% a 36.8%. El uso del techo convencional muestra tener el menor porcentaje de horas de confort térmico en las ciudades de Mexicali y Monterrey, con 16.3% y 15.3%, respectivamente.

Tanto en el dormitorio 1 como en el dormitorio 2, el techo verde reduce el confort térmico en la ciudad de Pachuca (Figura 9-10). Esto se debe a que, en Pachuca, el desconfort térmico se atribuye principalmente a condiciones de frío. En este contexto, el techo verde no representa una ventaja frente al techo convencional.

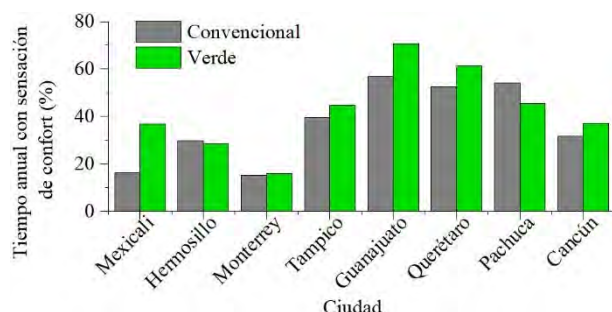


FIGURA 10. Porcentaje de tiempo de sensación de confort en el dormitorio 2.

En las ciudades de Guanajuato y Querétaro, la implementación del techo verde incrementa el porcentaje anual de tiempo con sensación térmica de confort (mayor a 60%) en los dos dormitorios estudiados, según los resultados del voto medio estimado (Figura 9-10). Debido a esto, no se realiza el análisis del consumo de energía destinado a la refrigeración utilizando tanto el techo convencional como el techo verde en estos dos casos.

En las Figuras 11 y 12 se muestra el consumo de energía destinada a la refrigeración en el dormitorio 1 y en el dormitorio 2, respectivamente, tanto para el techo convencional como para el techo verde. Este análisis fue para las 6 ciudades que no alcanzaran más del 60% de tiempo anual de confort térmico con la implementación del techo verde.

En Pachuca que tiene el clima más frío de las ciudades estudiadas se registra el menor consumo de energía destinada a la refrigeración con la implementación del techo verde (Figura 11-12). En el dormitorio 1, el techo verde no tiene un efecto significativo en la reducción del consumo de energía destinada a la refrigeración (Figura 11).

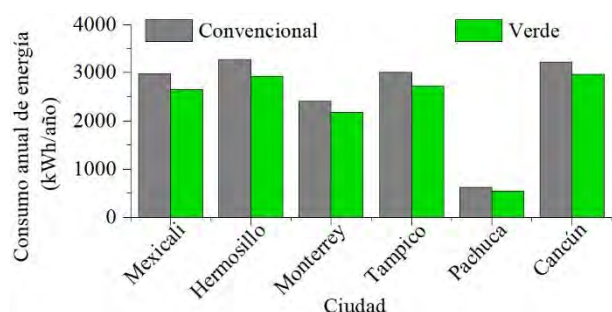


FIGURA 11. Consumo energía destinada a la refrigeración en el dormitorio 1.

El efecto del techo verde sobre la reducción del consumo de energía destinada a la refrigeración es más notoria en el dormitorio 2. Este comportamiento fue mas notable en las ciudades de Mexicali, Hermosillo, Tampico y Cancún; estas ciudades, tienen climas cálidos; secos en Mexicali y Hermosillo, y húmedos en Tampico y Cancún. El techo

verde analizado en este estudio tiene un LAI de 5 m²/m², ofreciendo una protección solar a la vivienda, permitiendo una reducción en la ganancia de calor a ésta. Más aún, el techo verde tiene la capacidad de disipar calor mediante la evapotranspiración, este efecto combina la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo, liberando humedad a la atmosfera. No obstante, este efecto queda fuera del alcance del presente estudio. Estas dos características del techo verde contribuye a la disminución del consumo de energía destinada a la refrigeración en los dormitorios.

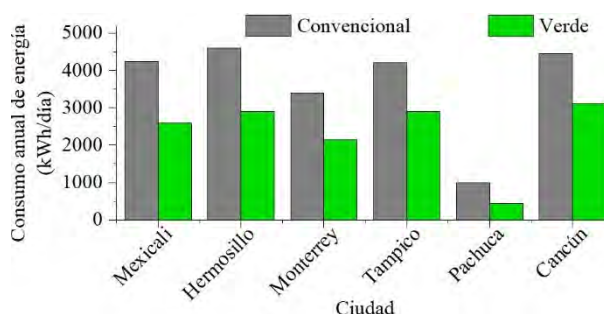


FIGURA 12. Consumo energía destinada a la refrigeración en el dormitorio 2.

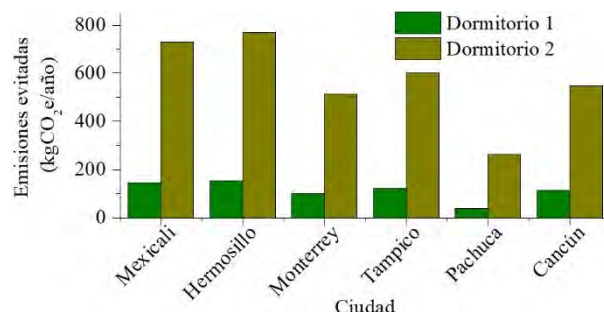


FIGURA 13. Emisiones evitadas de CO₂ equivalentes anuales en kilogramos debido a la implementación del techo verde.

En Pachuca se observó la menor reducción en emisiones, con 39.7 kg CO₂e en el dormitorio 1 y 262 kg CO₂e en el dormitorio 2. Esto se debe al clima frío de Pachuca, lo que reduce la energía destinada a la refrigeración en comparación con otras ciudades como Hermosillo o Mexicali, que presentan climas cálidos. En Mexicali se reporta la mayor reducción de emisiones, la implementación del techo verde en el dormitorio 2 reduce en casi un 40% el consumo de energía destinada a la refrigeración, lo que representa una disminución anual de 728.9 kg CO₂e.

6. CONCLUSIONES

La implementación del techo verde mejora la sensación de confort térmico en los dormitorios, siendo este efecto más



evidente en el dormitorio 2, donde una de sus superficies corresponde directamente al techo verde. Esta mejora es particularmente significativa en ciudades con climas cálidos, como Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Tampico y Cancún. En ciudades con climas templados, como Guanajuato y Querétaro, el uso del techo verde permite alcanzar condiciones de confort durante más del 60% en un periodo anual. Sin embargo, en Pachuca, su implementación puede disminuir dicho porcentaje, ya que intensifica la sensación de frío. Por ello, es fundamental considerar las características climáticas locales al evaluar la viabilidad y efectividad de los techos verdes como estrategia para mejorar el confort térmico en los espacios interiores.

La implementación de techos verdes en el modelo de la vivienda reduce el consumo energético en los espacios estudiados, particularmente en el dormitorio 2, donde su efecto es más notable. En la ciudad de Hermosillo, por ejemplo, se registró una disminución de hasta 1765 kWh/año en dicho dormitorio. Esta reducción en el consumo de energía se refleja, a su vez, en una menor emisión de gases de efecto invernadero, expresada en términos de CO₂ equivalente. En este contexto, la implementación de los techos verdes en viviendas podría representar una estrategia para reducir el consumo de energía en equipos de aire acondicionado y contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero.

En trabajos futuros se propone analizar el impacto de la implementación de techos verdes en otros tipos de edificaciones, así como evaluar el efecto de diversas características de los techos verdes, tales como el índice de área foliar, el espesor y el contenido de humedad del sustrato, considerando las condiciones climáticas específicas de cada región de México.

REFERENCIAS

Artículos

- [1]. Florides, G. A., & Christodoulides, P. (2009). Global warming and carbon dioxide through sciences. *Environment International*, 35(2), 390–401. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2008.07.007>
- [2]. Cabeza, L. F., Q. Bai, P. Bertoldi, J.M. Kihila, A.F.P. Lucena, É. Mata, S. Mirasgedis, A. Novikova, Y. Saheb, 2022: Buildings. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.011
- [3]. Clarke, L., Eom, J., Marten, E. H., Horowitz, R., Kyle, P., Link, R., Mignone, B. K., Mundra, A., & Zhou, Y. (2018). Effects of long-term climate change on global building energy expenditures. *Energy Economics*, 72, 667–677. <https://doi.org/10.1016/J.ENERCO.2018.01.003>
- [4]. Ai, K., & Yan, X. (2024). Can Green Infrastructure Investment Reduce Urban Carbon Emissions: Empirical Evidence from China. *Land* 2024, Vol. 13, Page 226, 13(2), 226. <https://doi.org/10.3390/LAND13020226>
- [5]. Seyedabadi, M. R., Karrabi, M., Nabati, J., & Rowe, D. B. (2024). Long-term effectiveness of green roofs in building sustainability through carbon emission and sequestration. *Environment, Development and Sustainability*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/S10668-024-05597-Z/FIGURES/7>
- [6]. Wang, L., Wang, H., Wang, Y., Che, Y., Ge, Z., & Mao, L. (2022). The relationship between green roofs and urban biodiversity: a systematic review. *Biodiversity and Conservation*, 31(7), 1771–1796. <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02436-3>
- [7]. Arellano-Leyva, E. A., López-Portillo, M., Muñoz-Villers, L. E., & Prado-Pano, B. L. (2021). Rainfall retention and runoff generation processes in tropical mature green roof ecosystems. *Hydrological Processes*, 35(11), e14382. <https://doi.org/10.1002/HYP.14382>
- [8]. Carrasco Aldunate, C., Palme, M., & Valenzuela Cabezas, J. (2024). Green Roofs Application on Urban Heat Island Mitigation in the Valparaíso City, Chile. *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno*, 19(56). <https://doi.org/10.5821/ACE.19.56.12581>
- [9]. Tadeu, A., Carrilho, J., Cortês, A., Ferreira, F., & Almeida, J. (2024). Acoustic absorption, scattering, and diffusion provided by green roof systems. *Building and Environment*, 262, 111778. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2024.111778>
- [10]. Pragati, S., Shanthi Priya, R., Pradeepa, C., & Senthil, R. (2023). Simulation of the Energy Performance of a Building with Green Roofs and Green Walls in a Tropical Climate. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 2006, 15(3), 2006. <https://doi.org/10.3390/SU15032006>
- [11]. Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez, E., & Chagolla-Aranda, M. A. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy





- performance of a residential building standard for Mexico. *Energy and Buildings*, 209, 109709. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109709>
- [12]. Polo-Labarríos, M. A., Quezada-García, S., Sánchez-Mora, H., Escobedo-Izquierdo, M. A., & Espinosa-Paredes, G. (2020). Comparison of thermal performance between green roofs and conventional roofs. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100697. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2020.100697>
- [13]. SEMARNAT. (2023). Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2022.
- [14]. İokhim, P., & Ekşi, M. (2024). Thermal regulation capacity of a green roof in the Mediterranean climate of Istanbul. *Building Services Engineering Research & Technology*, 45(2), 185-201.



Alfredo Tobias Salas. Es ingeniero en Energías Renovables por la Universidad de Guanajuato y Maestro en Ingeniería en Energía por la UNAM. Actualmente, realiza un Doctorado en Ingeniería en Energía en la misma institución. Su proyecto se enfoca en la transferencia de conocimiento en el aprendizaje por refuerzo para el control de sistemas HVAC. Sus áreas de interés incluyen la simulación energética en edificios y el aprendizaje por refuerzo.



energética en edificaciones.

M. Azucena Escobedo Izquierdo es profesora en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Es Doctora en Arquitectura por la UNAM, Maestra en Ingeniería en Energía por la UNAM e Ingeniera Eléctrica por la UNAM. Tiene experiencia de más de 30 años en eficiencia energética. Trabajó en la CONUEE por 10 años. Su tema de interés actual es la eficiencia



Sergio Quezada García. Es profesor de carrera de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y es miembro del SNII (Nivel 2). También se desempeñó como profesor en la UNITEC, UACM y UAM. Sus líneas de interés son: eficiencia energética, sostenibilidad y energías renovables. Es Doctor y Maestro en Ingeniería en Energía por la UNAM y es Ingeniero en Energía por la UAM.





Techos fríos: cómo pintar tu vivienda podría ayudar al planeta (y a tu bolsillo)

ALFREDO TOBIAS SALAS¹, RICARDO ISAAC CÁZARES RAMÍREZ¹,
SERGIO QUEZADA GARCÍA¹

¹Departamento de Sistemas Energéticos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México, 04510, México

Autor de Correspondencia: Ricardo Isaac Cázares Ramírez (e-mail: ricazaresr@gmail.com).

Este trabajo contó con financiamiento de la SECITHI proporcionado a R.-I. Cázares-Ramírez (CVU 387444) a través de la beca postdoctoral EPM 2023.

RESUMEN El cambio climático ha generado un aumento de la temperatura global; en las ciudades el calor se acumula con mayor intensidad, afectando la calidad de vida y el consumo energético debido al uso de equipos activos de enfriamiento como ventiladores y aire acondicionado. Esta creciente demanda energética incrementa los costos para las familias, y también contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero. Una solución sencilla, económica y efectiva, que puede ayudar ante esta situación, son los techos fríos. Esta tecnología consiste en aplicar un recubrimiento especial sobre el techo de las viviendas que refleja la radiación solar en lugar de absorberla; lo que, reduce el calor que ingresa a la vivienda. En este trabajo se analizó, mediante simulaciones computacionales, el comportamiento térmico de un modelo de vivienda con techo convencional y con techo frío en la Ciudad de México, considerando escenarios climáticos futuros (años 2030, 2050 y 2100). Los resultados mostraron que el uso de techos fríos puede reducir significativamente la temperatura interior y el consumo de energía para refrigeración. Los techos fríos representan una medida accesible y su implementación masiva podría ayudar a reducir las emisiones de carbono que son consecuencia del consumo de energía eléctrica para climatización.

PALABRAS CLAVE: Calor, Refrigeración pasiva, Confort térmico, Sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) reporta que las actividades humanas como el uso de combustibles fósiles y procesos industriales, que emiten gases de efecto invernadero, han provocado sin duda el calentamiento

global, resultando en el aumento de la temperatura superficial global en 1.1°C en el periodo 2011-2020, respecto a 1850-1900 [12].

En 2019, el consumo mundial de energía final de los edificios alcanzó los 128.8×10^{18} J, lo que representa el 31% del consumo total de energía final a nivel mundial. Los edificios residenciales fueron responsables del 70% de este consumo energético en el sector de los edificios [1]. Con el cambio climático, el aumento de la población y el crecimiento económico es probable que aumente el consumo de energía destinado a la climatización y especialmente a la refrigeración de espacios [2], resultando en un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El techo de los edificios es la parte de la envolvente que está más expuesta a la radiación solar [3]. Esta radiación solar que recibe el techo implica una ganancia de calor que se transfiere al interior del edificio, aumentando su temperatura. Una tecnología para reducir esta ganancia de calor son los techos fríos. Un techo frío es una técnica pasiva de refrigeración que utiliza un recubrimiento en la superficie expuesta al Sol, que se caracteriza por tener un alto valor de reflectancia solar y emisividad; es decir, refleja una gran cantidad de radiación solar y puede emitir mucho calor hacia el ambiente. Estas características logran disminuir el flujo de calor que entra a la vivienda, logrando reducir la temperatura interior [4] y, por lo tanto, disminuye el consumo de energía destinado a la refrigeración de espacios con equipo de aire acondicionado [5]. Los techos fríos pueden ser una estrategia económica para reducir la ganancia de calor por su buena relación costo-beneficio [6] y su facilidad de aplicación.

1.1. Antecedentes

Se han realizado estudios en México sobre los beneficios de los techos fríos; Lucero-Álvarez & Martín-Domínguez [7], estimaron la reducción en el consumo anual de energía de





aire acondicionado que se produce al variar la reflectancia solar, emisividad y el aislamiento térmico para un modelo de una vivienda de 47 m²; el estudio se realizó en 20 ciudades de México. Los mayores efectos de la reflectancia solar y la emisividad sobre el consumo de energía se encuentran en Acapulco, Campeche, Culiacán, Veracruz, Cuernavaca, Guadalajara, Hermosillo y Monterrey.

Hernández-Pérez et, al. [8] evaluaron el rendimiento térmico de un techo convencional con impermeabilizante color rojo y dos techos fríos, haciendo una comparación con un techo gris sin ningún tipo de recubrimiento; esto se realizó con dos unidades de prueba al aire libre en Cuernavaca, México. El techo con impermeabilizante color rojo tuvo una temperatura superficial 3°C mayor que el techo gris, lo que da un flujo de calor 20% mayor. Mientras que, los techos fríos redujeron la temperatura superficial entre 10°C y 14.6°C en comparación con el techo gris, resultando en una reducción de la ganancia de calor de 59% a 80% con respecto al techo gris.

Hernández-Pérez [9] simularon el comportamiento térmico de techos de concreto con recubrimientos tradicionales y reflectantes utilizando una herramienta computacional. Se compararon los techos sin aislamiento térmico y con aislamiento térmico, tomando un techo gris como referencia. Los resultados mostraron que los techos fríos sin aislamiento redujeron la temperatura superficial entre 11°C y 16°C y la ganancia de calor entre 41% y 54%; mientras que, los techos fríos con aislamiento disminuyeron la temperatura superficial entre 17°C y 21°C y la ganancia de calor entre 37% y 56%.

Como se puede ver, se han estudiado los techos fríos mediante simulaciones para analizar su comportamiento térmico y determinar su potencial para el ahorro de energía destinada a la refrigeración de espacios. Sin embargo, estos estudios han centrado su atención en la implantación de los techos fríos en las condiciones climatológicas actuales y no han explorado su potencial en el futuro. Igualmente, se ha estudiado que el uso de los techos fríos puede no ser idóneo para la conservación de energía para algunos climas, tomando en cuenta las condiciones climatológicas actuales, pero esta tecnología puede convertirse en una estrategia en un futuro.

El objetivo de este trabajo es determinar el impacto térmico de la implementación de un techo frío en una vivienda sometida a las condiciones climáticas de la Ciudad de México. En el trabajo se toma como caso de estudio un dormitorio en una vivienda y se determina el consumo energético para la refrigeración. Se utiliza el programa de modelación energética *EnergyPlus*, con *OpenStudio* como interfaz gráfica, para simular diversos escenarios climáticos a corto (2030), mediano (2050) y largo plazo (2100) para

determinar la temperatura en el dormitorio y evaluar el ahorro de energía debido a la implementación del techo frío.

2. METODOLOGÍA

Para determinar el impacto térmico de la implementación de un techo frío en un modelo de vivienda sometido a las condiciones climáticas de la Ciudad de México bajo tres escenarios de mitigación (estricto, mediano y bajo) del cambio climático a corto, mediano y largo plazo, se implementa la siguiente metodología.

1. Recolección de datos climáticos de la Ciudad de México para escenarios de mitigación estricta (RCP2.6), mitigación media (RCP4.5) y mitigación baja (RCP8.5), correspondientes a los años 2030 (corto plazo), 2050 (mediano plazo) y 2100 (largo plazo). Para ello, se utiliza el software *Meteonorm 8*, generando archivos en formato .epw para su posterior uso en simulaciones.
2. Diseño 3D, del modelo de vivienda, en el software *SketchUp* utilizando la extensión de *OpenStudio*.
3. Exportación del modelo 3D desde *OpenStudio*, que sirve como interfaz para el motor de simulación *EnergyPlus*, con el fin de realizar las simulaciones.
4. Evaluación de los diferentes escenarios en los plazos estudiados, partiendo del caso base con condiciones climáticas actuales, para determinar la temperatura interna del modelo de vivienda. Las simulaciones se realizan para todo el año.
5. Determinación de los periodos de operación del equipo de acondicionamiento de aire en la simulación, con el objetivo de mantener una temperatura interior de 23 °C. Esta simulación se basa únicamente en los datos climáticos y considera solo la refrigeración, sin calefacción.
6. Repetición del paso 4, ahora incorporando un equipo de acondicionamiento de aire en la simulación, para determinar el consumo energético del modelo de vivienda con techo convencional (impermeabilizante de color rojo) y con techo frío.
7. A partir de los consumos energéticos obtenidos para cada tipo de techo, se determina el ahorro energético para cada escenario debido a la implementación del techo frío.

2.1. Datos climáticos futuros

En 2014, el IPCC publicó las trayectorias de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés) para proyectar los cambios climáticos futuros en los posibles escenarios tomando en cuenta factores socioeconómicos y ambientales (IPCC, 2014). Dichas trayectorias incluyen un escenario de mitigación estricta (RCP2.6), dos escenarios con mitigación media (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con mitigación baja (RCP8.5); es decir, contempla niveles muy altos de



emisiones de gases de efecto invernadero [13]. Para estudiar los casos a corto, mediano y largo plazo se escogieron los años 2030, 2050 y 2100, respectivamente, para los escenarios de mitigación estricta, mitigación intermedia y mitigación baja del cambio climático en la Ciudad de México. Se utilizó el programa *Meteonorm* ya que permite la obtención de estos datos climáticos futuros en un formato apto para *EnergyPlus*.

La Ciudad de México se encuentra en una latitud 19.3° y longitud -99.1°, a una altitud de 2355 m sobre el nivel del mar. De acuerdo a la clasificación climática de Köppen-Geige, pertenece a la zona CwB, que se caracteriza por un clima templado con inviernos secos, su temperatura promedio anual es de 16.8 °C, de acuerdo con datos recolectados entre 1974 y 2018 para un año meteorológico típico [10].

2.2. Descripción del modelo de vivienda

La vivienda que se estudia tiene dos paredes contiguas a las viviendas adyacentes; por lo que, estas dos superficies se consideran adiabáticas (ver **Figura 1**). La vivienda consta de dos niveles, pero el estudio sólo considera el dormitorio 2 ubicado en el primer piso (ver **Figura 2**). Se estudia el dormitorio 2 porque los dormitorios son los espacios donde se suelen implementar equipos de acondicionamiento de aire; además, se toma el dormitorio 2 porque una de sus envolventes es el techo frío y, por lo tanto, su impacto es mayor en la temperatura de este dormitorio. El techo convencional tiene una emisividad de 0.24 y una absorptividad de 0.76, correspondiente a un impermeabilizante de color rojo; mientras que, el techo frío presenta una emisividad de 0.88 y una absorptividad de 0.13. El equipo de aire acondicionado que se modela es de flujo de refrigerante variable (VRF) con un coeficiente de desempeño (COP) de 5 y la temperatura de confort, a la que se desea llegar en el interior del dormitorio, es de 23°C.

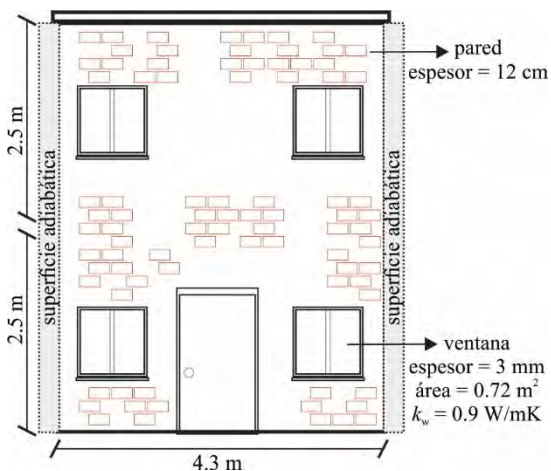


FIGURA 1. Fachada y dimensiones de la vivienda.

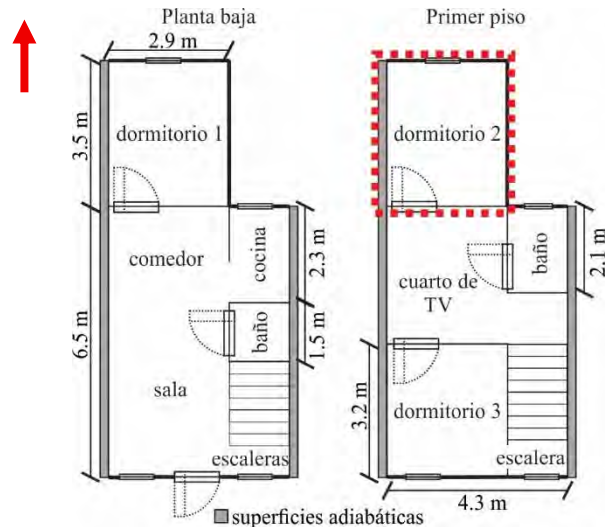


FIGURA 2. Planos de la vivienda, el dormitorio 2 es el espacio estudiado en el presente trabajo. La orientación norte se muestra con la flecha en la esquina superior izquierda.

2.3. Cálculo de los grados-hora de desconfort (DDH)

Para evaluar el grado de confort térmico interior, se calcularon los grados-hora de desconfort (Discomfort Degree Hours, DDH), que representan la suma de las desviaciones de la temperatura interior respecto a la temperatura neutral.

Los DDH se dividen en horas de desconfort por frío (DDH_c) y por calor (DDH_h), calculadas de acuerdo con las ecuaciones:

$$DDH_c = \sum (T_n - T_{in})\Delta t \quad \text{si } T_{in} < T_n \quad (1)$$

$$DDH_h = \sum (T_{in} - T_n)\Delta t \quad \text{si } T_{in} > T_n \quad (2)$$

Donde T_{in} es la temperatura interior simulada, T_n es la temperatura neutral dada por:

$$T_n = 13.5 + 0.54T_a \quad (3)$$

Siendo T_a la temperatura media diaria exterior en °C y Δt el intervalo de simulación.

Con este parámetro es posible identificar si la vivienda presenta mayor desconfort por calor o por frío y evaluar la pertinencia del uso del techo frío en el clima de la Ciudad de México.

RESULTADOS

En el escenario base o actual, la temperatura promedio anual en la Ciudad de México es de 18.8°C, la temperatura anual máxima es de 28.5°C y la mínima es de 7.8°C. Las simulaciones muestran, en el escenario base, que la temperatura promedio anual del dormitorio 2 es de 23.6°C y de 21.9°C en el modelo de vivienda con techo convencional (impermeabilizante color rojo) y con techo frío, respectivamente. Esto muestra que actualmente se requieren equipos de acondicionamiento de aire o técnicas pasivas de refrigeración para alcanzar la temperatura de confort (23°C). De hecho, se estima que para satisfacer la necesidad de refrigeración en el dormitorio 2 con techo convencional (impermeabilizante color rojo) se requieren poco menos de 2000 kWh al año; la implementación del techo frío reduce este consumo a 1050 kWh al año, lo cual equivale a un ahorro energético de casi 1000 kWh al año. Sin embargo, debido al cambio climático, esto puede cambiar en el futuro; por lo cual, es importante analizar los diferentes escenarios de mitigación a lo largo del tiempo.

En la **Figura 3** se muestra la proyección de la temperatura promedio anual bajo los escenarios de mitigación estricta (RCP2.6), mitigación media (RCP4.5) y mitigación baja (RCP8.5) del cambio climático a corto (2030), mediano (2050) y largo plazo (2100). Cada grupo de barras representa un escenario diferente de mitigación. Con color verde el escenario de mitigación estricta, con color morado el escenario de mitigación media y con color rojo el escenario de mitigación baja.

Se observa que la temperatura promedio anual aumenta conforme se avanza en el tiempo, especialmente bajo escenarios de baja mitigación. En el largo plazo, el escenario de mitigación baja alcanza temperaturas promedio cercanas a los 23°C; mientras que, el escenario estricto se mantiene por debajo de los 19°C.

En el corto plazo, las temperaturas máximas son de 29.4°C, 28.5 °C y 29.5 °C para los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Las temperaturas mínimas correspondientes son de 7.4 °C, 7.6 °C y 7.2 °C. En el mediano plazo, las temperaturas máximas son de 28.5 °C, 29.8 °C y 30.2 °C para RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, mientras que las temperaturas mínimas son de 7.8 °C, 8.2 °C y 8.4 °C, respectivamente. En el largo plazo, las temperaturas máximas llegan hasta 28.9 °C, 31.5 °C y 33.6 °C para RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente, con temperaturas mínimas de 7.8 °C, 9.5 °C y 11.3 °C.

Considerando los tres escenarios, se observa una tendencia al incremento de las temperaturas máximas y mínimas, siendo dicho aumento más acentuado en el escenario RCP8.5, correspondiente al caso de menor mitigación de emisiones.

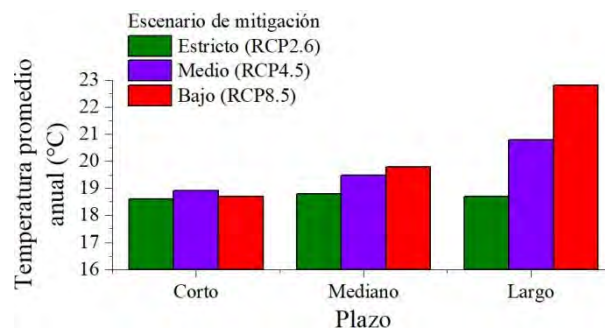


FIGURA 3. Temperatura promedio anual de Ciudad de México para los diferentes escenarios.

La **Figura 4** tiene una estructura similar, pero en ella se reportan los resultados obtenidos para la temperatura promedio anual del dormitorio 2 del modelo de vivienda con techo convencional (impermeabilizante de color rojo) en la Ciudad de México y se puede observar en el largo plazo una diferencia de casi 4°C entre los escenarios de mitigación estricta y baja.

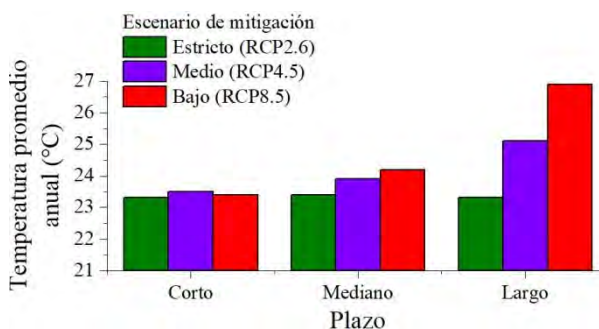


FIGURA 4. Temperatura promedio anual del dormitorio 2 en una vivienda con techo convencional en la Ciudad de México.

En la **Figura 5** se puede observar cómo la temperatura promedio anual del dormitorio 2 del modelo de vivienda con techo frío alcanza valores más bajos, de temperatura, en comparación con los del techo convencional (ver **Figura 4**). Por ejemplo, para el escenario estricto, en los 3 plazos no superan los 22°C; mientras que, con el techo convencional para el mismo escenario en los 3 plazos es de alrededor de 23.5°C. Si consideramos el caso más extremo, es decir, el escenario de mitigación baja a largo plazo, la diferencia es de casi 2°C al implementar el techo frío.

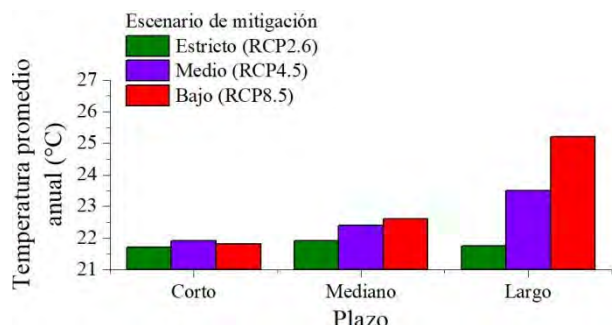


FIGURA 5. Temperatura promedio anual del dormitorio 2 en una vivienda con techo frío en la Ciudad de México.

En la **Figura 6** se muestra el ahorro anual de energía destinada a la refrigeración del dormitorio 2 por la implementación del techo frío en el modelo de vivienda. En el corto plazo se tienen ahorros anuales de energía de alrededor de 900 kWh para los tres escenarios. En el mediano plazo, los ahorros anuales de energía van de 900 kWh (para el escenario de mitigación estricta) hasta 1100 kWh (para el escenario de mitigación baja). A largo plazo los ahorros anuales de energía van de 900 kWh (para el escenario de mitigación estricta) hasta los 1,200 kWh (para el escenario de mitigación baja). Estos resultados demuestran que es importante la implementación de techos fríos desde el punto de vista del confort térmico y ahorro energético.

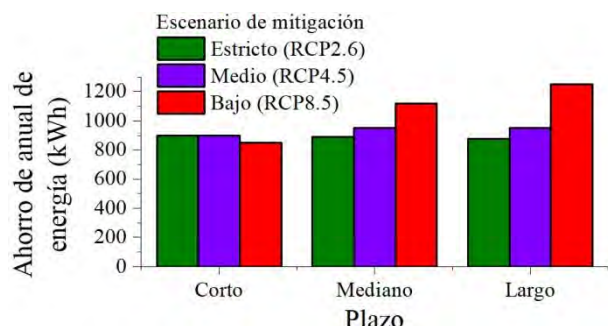


FIGURA 6. Ahorro anual de energía destinada a la refrigeración del dormitorio por la implementación del techo frío en la vivienda.

En la **Figura 7** se presenta el comportamiento del DDHc en el dormitorio 2 con techo convencional. En el corto y mediano plazo, el valor promedio del parámetro DDHc se mantiene prácticamente constante. Sin embargo, en el largo plazo se observa una disminución conforme al nivel de mitigación considerado. En el escenario de baja mitigación (RCP8.5), el DDHc alcanza un valor de 10848, lo que indica una reducción en la necesidad de calefacción debido al incremento de las temperaturas exteriores asociado a las altas emisiones de gases de efecto invernadero.

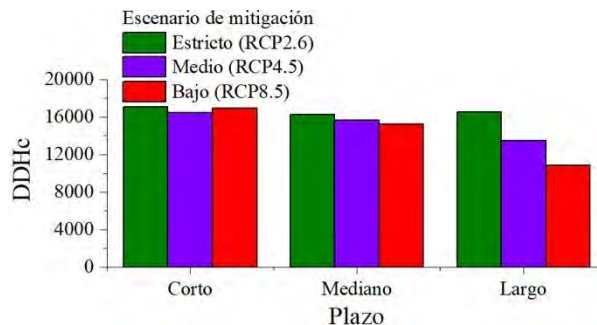


FIGURA 7. DDHc en el dormitorio 2 con un techo convencional.

En la **Figura 8** se muestra el DDHh en el dormitorio 2 con techo convencional. Este parámetro presenta un comportamiento similar al DDHc en el corto y mediano plazo, manteniéndose relativamente constante en promedio. No obstante, en el largo plazo, bajo el escenario de baja mitigación, el DDHh aumenta significativamente, alcanzando un valor de 20336, lo que refleja un incremento en la necesidad de refrigeración.

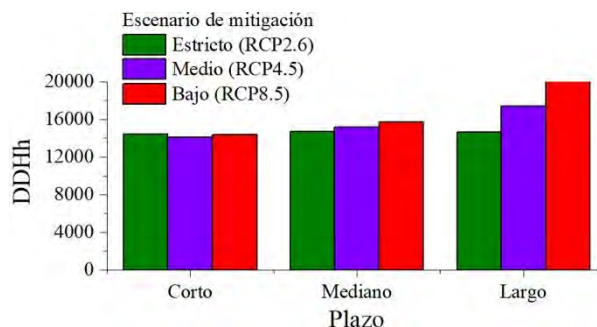


FIGURA 8. DDHh en el dormitorio 2 con un techo convencional.

En la **Figura 9** se presenta el DDHc correspondiente al dormitorio 2 con techo frío. De manera similar, el cambio más notable se manifiesta en el largo plazo. En el escenario de baja mitigación, el DDHc alcanza un valor de 14542, superior al registrado con el techo convencional, lo que implica una mayor demanda de calefacción en comparación con dicho caso.

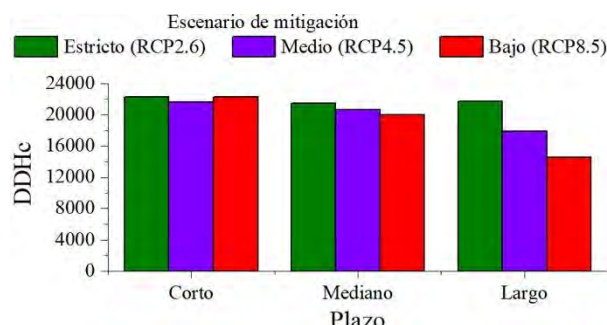


FIGURA 9. DDHc en el dormitorio 2 con un techo frío.

Finalmente, la **Figura 10** muestra el DDHh en el dormitorio 2 con techo frío. En el corto y mediano plazo, los valores se mantienen en torno a 5000. Sin embargo, en el largo plazo y bajo el escenario de baja mitigación, este valor se incrementa hasta 9,379, evidenciando un aumento en la necesidad de refrigeración.

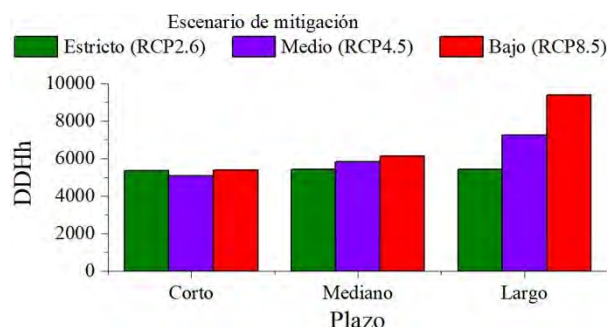


FIGURA 10. DDHh en el dormitorio 2 con un techo frío.

Estos resultados respaldan la importancia de implementar técnicas pasivas de refrigeración, como los techos fríos, para alcanzar condiciones de confort dentro de las edificaciones. Esta medida resulta especialmente útil en zonas urbanas densamente pobladas como la Ciudad de México; donde, se ve que a largo plazo y bajo un escenario de mitigación baja del cambio climático la temperatura promedio anual aumentará más de 4°C (ver **Figura 3**); por lo cual, será indispensable utilizar técnicas pasivas de refrigeración y/o equipos de acondicionamiento de aire para alcanzar condiciones de confort dentro de las edificaciones.

Además, el consumo energético para refrigeración se reduce considerablemente (esto se ve en el ahorro energético mostrado en la **Figura 6**), confirmando la efectividad de los techos fríos como técnica pasiva de refrigeración para alcanzar el confort térmico. Estas mejoras son especialmente relevantes en ciudades como la Ciudad de México, donde la urbanización y el aumento poblacional incrementarán la demanda de enfriamiento.

6. CONCLUSIONES

Actualmente, se requiere el uso de equipos activos de acondicionamiento de aire o técnicas pasivas de refrigeración para alcanzar la temperatura de confort térmico dentro del dormitorio 2 del modelo de vivienda con techo convencional. En el futuro estas medidas serán indispensables para alcanzar la temperatura de confort, debido a que se estima que la temperatura promedio anual en la Ciudad de México aumente más de 4°C bajo un escenario de baja mitigación del cambio climático.

La implementación del techo frío ayuda a ahorrar energía destinada a la refrigeración del dormitorio 2 del modelo de vivienda. De hecho, este ahorro aumenta a mediano y largo plazo, en especial en el escenario de baja mitigación, donde se puede tener un ahorro energético anual de casi 1,200 kWh. El estudio demuestra que los techos fríos son una solución viable para acercarse a la temperatura de confort térmico y reducir el consumo de energía. Su implementación permite reducir significativamente la temperatura interior de viviendas, así como el consumo energético asociado a sistemas de refrigeración. Los resultados respaldan la importancia de su implementación masiva como política pública o estrategia urbana de sostenibilidad, especialmente en entornos con climas templados (como el de la Ciudad de México) y cálidos o propensos a olas de calor.

El análisis de los grados-hora de desconfort permitió identificar que, aunque el techo frío reduce significativamente el desconfort por calor (DDH_c), también puede incrementar ligeramente el desconfort por frío (DDH_h) durante las noches y los meses más fríos del año. Por lo tanto, para el clima templado de la Ciudad de México, el techo frío representa una estrategia adecuada para mejorar el confort térmico diurno y reducir el consumo energético por refrigeración; sin embargo, su implementación podría requerir medidas complementarias de aislamiento o calefacción ligera, particularmente en recámaras cuyo uso es predominantemente nocturno.

REFERENCIAS

- [1]. Cabeza, L. F., Q. Bai, P. Bertoldi, J.M. Kihila, A.F.P. Lucena, É. Mata, S. Mirasgedis, A. Novikova, Y. Saheb, 2022: Buildings. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge



- University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.011
- [2]. Santamouris, M. (2016). Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- [3]. Todeschi, V., Mutani, G., Baima, L., Nigra, M., & Robiglio, M. (2020). Smart Solutions for Sustainable Cities—The Re-Coding Experience for Harnessing the Potential of Urban Rooftops. *Applied Sciences*, 10(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/app10207112>
- [4]. Sahito, A. A., Memon, R. A., Harijan, K., & Shaikh, P. H. (2020). Simulation of Thermal Performance and Cost Benefits of Cool Roof Options through Building Engineering System Software. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 39(4), Article 4. <https://doi.org/10.22581/muet1982.2004.13>
- [5]. Xu, T., Sathaye, J., Akbari, H., Garg, V., & Tetali, S. (2012). Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. *Building and Environment*, 48, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.011>
- [6]. Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., & Aguilar-Castro, K. M. (2017). Chapter 4—Reflective Materials for Cost-Effective Energy-Efficient Retrofitting of Roofs. En F. Pacheco-Torgal, C.-G. Granqvist, B. P. Jelle, G. P. Vanoli, N. Bianco, & J. Kurnitski (Eds.), *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting* (pp. 119–139). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00004-6>
- [7]. Lucero-Álvarez, J., & Martín-Domínguez, I. R. (2019). The effect of solar reflectance, infrared emissivity, and thermal insulation of roofs on the annual energy consumption of single-family households in México. *Indoor and Built Environment*, 28(1), 17–33. <https://doi.org/10.1177/1420326X17729194>
- [8]. Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I., & Simá, E. (2018). Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings. *Energy and Buildings*, 158, 569–579. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.085>
- [9]. Hernández-Pérez, I. (2021). Influence of Traditional and Solar Reflective Coatings on the Heat Transfer of Building Roofs in Mexico. *Applied Sciences*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/app11073263>
- [10]. Betti, G., Tartarini, F., Nguyen, C., Schiavon, S. CBE Clima Tool: A free and open-source web application

for climate analysis tailored to sustainable building design. *Build. Simul.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5>. Version: 0.8.17.

Memorias en Congreso

- [11]. IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- [12]. IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.



Alfredo Tobias Salas. Es ingeniero en Energías Renovables por la Universidad de Guanajuato y Maestro en Ingeniería en Energía por la UNAM. Actualmente, realiza un Doctorado en Ingeniería en Energía en la misma institución. Su proyecto se enfoca en la transferencia de conocimiento en el aprendizaje por refuerzo para el control de sistemas HVAC. Sus áreas de interés incluyen la simulación energética en edificios y el aprendizaje por refuerzo.

Ricardo Isaac Cázares Ramírez. Doctor en Ciencias en Energía y Medio Ambiente, por la UAM. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica, por el IPN. Ingeniero en Energía, por la UAM. Ingeniero en Control y Automatización, por el IPN. Líneas de interés: energías limpias, y control automático. Fue profesor-investigador en la UAM y UACM. Actualmente realiza un Posdoctorado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y es miembro del SNII (Nivel 1).



Sergio Quezada García. Es profesor de carrera de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y es miembro del SNII (Nivel 2). También se desempeñó como profesor en la UNITEC, UACM y UAM. Sus líneas de interés son: eficiencia energética, sostenibilidad y energías renovables. Es Doctor y Maestro en Ingeniería en Energía por la UNAM y es Ingeniero en Energía por la UAM.





Hidrógeno blanco, energía limpia y renovable que emerge de la Tierra

LUIS ÁNGEL VALENCIA FLORES^{1,2}, SELENE MONTSERRAT GARCÍA SOLARES^{1,3},
MARIO ALBERTO GUZMÁN VEGA⁴, LEONEL RODRÍGUEZ FLORES⁵

¹Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Av. Acueducto S/N, Ticoman, Gustavo A. Madero, 07340 Ciudad de México, México.

²Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Ticomán, Ciencias de la Tierra, Calz. Ticomán 55, La Laguna Ticoman, Gustavo A. Madero, 07340 Ciudad de México.

³Instituto Politécnico Nacional, Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles (LaNDACBio), Ciudad de México 07340, México.

⁴Instituto Colombiano del Petróleo y Energías de la Transición, Vicepresidencia de Ciencia, Tecnología e Innovación, Ecopetrol, Colombia.

⁵Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad, Av. Wilfrido Massieu, Adolfo López Mateos S/N, Nueva Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero, 07738 Ciudad de México.

Autor de Correspondencia: Luis Ángel Valencia Flores (e-mail: lvalenciaf@ipn.mx) Selene Monserrat García Flores (e-mail: sgarcias@ipn.mx)

RESUMEN El hidrógeno es un vector energético versátil, además de una fuente de energía primaria que comúnmente se obtiene por procesos fisicoquímicos y biológicos, se conoce como hidrógeno "verde," "azul," o "gris". Por otro lado, el hidrógeno generado a través de procesos geológicos, como son reacciones químicas en el subsuelo entre minerales ricos en hierro y agua, o derivado de cambios moleculares en la materia orgánica en cuencas petroleras es conocido como hidrógeno "blanco, natural o geológico". Este gas se encuentra atrapado en ciertas formaciones geológicas de campos petroleros o puede filtrarse hacia la superficie a través de fracturas presentes en el subsuelo en ciertos lugares del planeta.

El hidrógeno blanco puede generarse en asociación con rocas ultramáficas serpentizadas llamadas ofiolitas, que presentan una secuencia o conjunto litológico de origen ígneo, pasando por procesos metamórficos y cambiando su estructura mineralógica original. Las ofiolitas se han localizado en diversas partes del mundo, tanto en la superficie como en el subsuelo. Estas rocas, al estar enterradas y sometidas a determinadas temperaturas, podrían ser la clave para la generación de hidrógeno de forma natural.

El hidrógeno blanco, al ser producido de manera natural, no genera emisiones de gases de efecto invernadero durante su generación y, aunque se encuentra en etapas tempranas de exploración comercial, podría ser una fuente importante para la transición energética, complementando otras formas de hidrógeno más industrializadas.

El presente trabajo tiene como objetivo identificar áreas con potencial evidencia de emisiones de hidrógeno blanco, para su posible incorporación al sector energético nacional. La metodología propuesta consiste en la exploración de hidrógeno blanco en cuencas sedimentarias con sistemas petroleros activos, a través del análisis de registros geofísicos de pozos, así como análisis exploratorios llevados a cabo mediante imágenes aéreas y/o satelitales para la identificación de rasgos geomorfológicos de interés en la superficie terrestre, sugiriendo manifestaciones de hidrógeno filtrado desde el subsuelo.

Pensar en el hidrógeno blanco es como buscar una fuente de agua subterránea que se regenera constantemente en un desierto. No basta con saber que el agua existe o que hay humedad en la superficie; el desafío es entender cómo se forma esa agua bajo tierra (los mecanismos), dónde se acumula en cantidades suficientes para ser útil (las trampas y acumulaciones), cómo llega a la superficie (las emanaciones y círculos de hadas), y, lo más importante, cómo podemos acceder a ella de manera eficiente y sostenible (la exploración y producción) sin agotar su flujo continuo.

PALABRAS CLAVE: hidrógeno, blanco, energía, rocas, subsuelo.





1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de fuentes de energía limpias en México y en el mundo es cada vez más necesaria. Las emisiones de CO₂ derivadas del uso de combustibles de origen fósil contribuyen con el calentamiento global, incrementando la problemática ambiental y forzando la búsqueda de nuevas alternativas energéticas. El hidrógeno es un vector energético versátil, además de una fuente de energía primaria. En la actualidad, se genera principalmente a partir del gas y el carbón, pero también puede generarse mediante el uso de diferentes tecnologías como la electrólisis [1], que permite obtener hidrógeno a partir del rompimiento de las moléculas del agua (hidrógeno verde). Este gas obtenido se puede usar para producir energía eléctrica, mecánica o térmica, con procesos que solo generan agua como residuo, lo que ayuda a reducir las emisiones de CO₂. Sin embargo, los costos actuales de producción de hidrógeno verde no permiten un despliegue masivo de la tecnología de electrólisis. Por otro lado, estudios recientes han demostrado que la generación de hidrógeno blanco (geológico o natural) puede provenir del subsuelo [2], idea que en otros países adquiere cada vez más importancia, ya que podría explotarse en forma similar a los yacimientos petroleros actuales, con una reducción muy importante en los costos de producción. El principal mecanismo postulado para la generación de hidrógeno blanco es a través de la interacción del agua con las rocas y la maduración tardía de las rocas madre ricas en carbón y materia orgánica [3]. Las rocas que contienen minerales de hierro en su composición pueden oxidarse y reducir el agua, así como las rocas radiactivas también pueden generar hidrógeno al romper la molécula del agua. Además de estas reacciones, se han postulado otras posibles formas de generar hidrógeno geológico proveniente del subsuelo como en el caso de Mali o Colombia [2], [3], [4]. Este trabajo refleja el inicio de una investigación para obtener el grado de Doctor en Energía, en el Centro Mexicano para la Producción más Limpia del Instituto Politécnico Nacional, propone iniciar la evaluación del potencial del hidrógeno blanco en México de dos maneras: Primero, a través la cartografía satelital y el análisis tectónico-mineralógico que sugiera la presencia de manifestaciones superficiales de hidrógeno blanco, así como, de rocas con potencial generador respectivamente. Segundo, buscando e identificando indicios de hidrógeno en los perfiles de pozos petroleros perforados y con datos disponibles, los cuales son abundantes en México. El hidrógeno blanco existe, desafiando el consenso científico previo que lo consideraba ausente en estado libre. Su

presencia ha sido identificada en numerosos ambientes geológicos a nivel global desde hallazgos pioneros en la Unión Soviética en los años 50 hasta descubrimientos recientes en campos hidrotermales y zonas con "círculos de hadas" en varios continentes. Un hito importante fue el descubrimiento en Mali, en 2015 derivado de una acumulación natural rica y pura (>98%), que actualmente se utiliza para la generación local de electricidad sin emisiones de CO₂. Los mecanismos principales postulados para la generación de hidrógeno blanco son la serpentinización, la radiólisis y la alta madurez orgánica, destacando la serpentinización. A diferencia de los hidrocarburos, el hidrógeno blanco se presenta como una energía "renovable" con carga dinámica a escala humana. Carece de un sello efectivo y tiende a escapar, con emanaciones superficiales que a menudo son significativas.

2. DESARROLLO

Este trabajo de investigación se enfoca en la exploración de rocas ricas en hierro y de rasgos considerados como diagnósticos para emanaciones de hidrógeno blanco mediante el análisis de imágenes satelitales, cartas geológicas generadas por instituciones nacionales, rasgos tectónicos, geología histórica, publicaciones científicas previas, así como de la información geológica/geofísica extraída de perfiles de pozos perforados. La metodología se implementa en cuencas sedimentarias con sistemas petroleros activos, mediante métodos de percepción remota, complementado con trabajo de campo puntual. Se están localizando rocas ultramáficas serpentinizadas, en primera instancia mediante sensores remotos y mapas geológicos. En el subsuelo, estas rocas sepultadas sujetas a ciertas temperaturas serían la clave para la generación del hidrógeno de manera natural, los pozos petroleros cercanos pueden dar la presencia del hidrógeno. Un análisis paleogeográfico aporta información muy valiosa acerca de la "oceanificación" (generación de corteza oceánica que está caracterizada por la secuencia ofiolítica) en alguna regiones o cuencas de nuestro país. Las ofiolitas son una secuencia idealizada de unidades de rocas que constituyen la corteza oceánica, descrita por primera vez a principios del siglo XX en los Alpes y en Chipre [5], para hacer referencia a una roca de tonalidades verdosas y de aspecto escamoso semejante a la piel de las serpientes, característica que le da su nombre (ofiolita: serpiente de piedra). Actualmente, no existen muchos yacimientos de hidrógeno blanco conocidos comercialmente, con la excepción del campo en Mali. La comunidad científica ya no debate si el hidrógeno blanco existe, sino dónde se acumula y/o dónde el



flujo es lo suficientemente grande como para permitir la producción. Esto implica una metodología enfocada en la caracterización y cuantificación de los recursos.

En resumen, la metodología llevada a cabo implica identificar indicadores geológicos como los círculos de hadas y emanaciones, comprender los mecanismos geológicos que lo generan y acumulan (especialmente la serpentización), aplicar técnicas geofísicas (como la sísmica) y los registros de pozos para delimitar los reservorios, y considerar las particularidades de su comportamiento (menor compresibilidad, ausencia de sello, influencia microbiana) para evaluar su viabilidad comercial.

Las tres principales líneas de exploración llevadas a cabo en este trabajo se describen a continuación:

2.1. Exploración e identificación de emanaciones de hidrógeno en la superficie terrestre.

La exploración semi regional y búsqueda de “círculos de hadas” utilizando imágenes tomadas por el “Satélite Sentinel 2” son muy importantes para la metodología. Estos círculos se caracterizan por tener una brecha o escasez de vegetación en su centro, lo que las hace fáciles de identificar desde el espacio, a pesar de la escasez de árboles, la vegetación no es nula. Un aspecto clave es la presencia de un halo o anillo de vegetación densa y saludable alrededor del área sin árboles. Este anillo de vegetación saludable, junto con la brecha central, define el área total afectada por la presencia de gas. El hidrógeno ya se ha identificado en numerosos ambientes geológicos en el mundo. Sus manifestaciones incluyen:

- **Emanaciones:** Reportadas con creciente frecuencia, la mayoría son pequeñas, pero algunas presentan altas concentraciones.
- **Campos hidrotermales:** Descubiertos en el Pacífico del este (1979) y la margen medio Atlántica (años 2000), con abundantes emisiones de hidrógeno y metano abiótico.
- **Estructuras semicirculares (“círculos de hadas”):** Se han identificado en diversas partes del mundo, como Brasil, Marruecos, Australia, Namibia, Colombia, Sudáfrica y Estados Unidos de Norteamérica (Fig. 1) [11].

La exploración de círculos de hadas comienza con el reconocimiento de sus características distintivas superficiales y luego avanza hacia el estudio del subsuelo mediante sísmica y perforación, buscando activamente los indicios geofísicos relacionados con los procesos de formación como la serpentización o la transformación de materia orgánica.

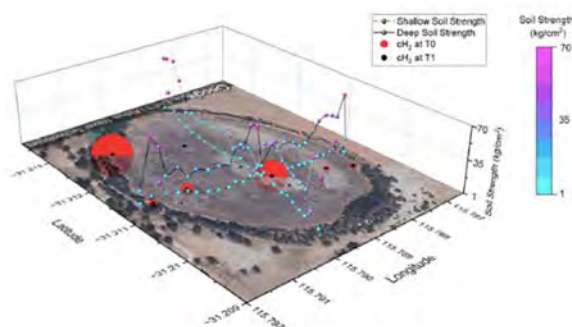


FIGURA 1. Ejemplo de “círculo de hadas” en Australia [11].

2.2. Hidrógeno en rocas ultramáficas

La serpentización es una reacción que implica la hidratación de rocas ultramáficas (ricas en hierro y magnesio) por el agua del mar o de los mantos acuíferos [6]. La serpentización es un proceso mediante el cual los minerales máficos, principalmente olivino y piroxeno, contenidos en las rocas ígneas que constituyen la corteza oceánica, son hidratados al entrar en contacto con el agua y ser extruidos en las dorsales oceánicas. Es un proceso generalmente de bajas presiones y temperaturas (entre 200 y 500 °C) que a través un conjunto de reacciones produce subproductos minerales como la serpentina (lizardita) y la brucita en el caso de la hidratación del olivino y la serpentina (antigorita) en el caso de la hidratación del piroxeno, además de hidrógeno molecular (Fig. 2) [6], [7].



FIGURA 2. Reacciones químicas generalizadas que indican el proceso de hidratación de los minerales ferromagnesianos

originales constituyentes de las rocas ultramáficas y que muestran como subproducto al hidrógeno [7].

Este hidrógeno puede en general redistribuirse en el ambiente y servir como alimento a organismos unicelulares o de composición simple como las arqueas que pueden consumir el hidrógeno para generar energía o pueden tener como subproducto metabólico al hidrógeno [8]. De tal manera que las arqueas en algún momento también podrían ser utilizadas como un índice de H₂ en el registro geológico, aunque caracterizar arqueas requiere mucho más tiempo y dinero que medir presencia de hidrógeno directamente.

Una opción adicional para considerar es la presencia de pirrotita, un mineral compuesto de hierro y azufre, que se puede formar en las chimeneas hidrotermales y constituir depósitos importantes en los yacimientos conocidos como “kuroko” y/o “troodos”, que, al entrar en contacto con el agua, también libera hidrógeno como subproducto de la reacción de oxidación [9].

2.3. Hidrógeno en pozos de petróleo

La exploración de hidrógeno mediante pozos de petróleo tiene como base la interpretación de registros geofísicos obtenidos durante la perforación. En este caso, se usan los registros de “rayos gamma, neutrones, densidad y tiempo de tránsito”, una información muy común en la industria petrolera. Esta información proviene de una herramienta llamada “sonda”, la cual tiene una fuente radiactiva que emite neutrones de alta energía. Estos chocan con las partículas de la roca en las paredes del pozo y en cada colisión pierden parte de su energía. La cantidad de energía perdida en cada colisión depende de la masa relativa del núcleo del fluido que exista en cada poro de la roca con la que chocó (el hidrógeno existe en el hidrocarburo y el agua). La mayor pérdida de energía ocurre cuando los neutrones chocan con núcleos de masa igual, como el hidrógeno. A los pocos microsegundos los neutrones han sido amortiguados y dispersados, sin perder más energía hasta que son capturados por núcleos de átomos tales como cloro, hidrógeno, sílice, etc. La cantidad de neutrones que regresa a la sonda después del choque es recibida y contabilizada por la herramienta. El conteo se traduce como cantidad o volumen de poros en la roca. Sin embargo, rara vez una roca supera el 30% de poros. Si la lectura es mayor a 45% en rocas libres de arcilla, entonces se puede pensar en la presencia de hidrógeno. Durante el desarrollo de esta etapa del proyecto, se analizan dos curvas o perfiles de pozos. La primera es la curva de “rayos gamma” que nos informa si existe la posibilidad de que la roca sea rica en contenido de arcilla. Si la roca contiene arcilla, no favorece a la búsqueda de hidrógeno, por lo tanto,

se buscan zonas en el pozo con bajo índice de rayo gamma, los que nos garantiza que la roca está libre de arcilla. El segundo paso es analizar la curva de “neutrones”, si esta curva indica muy altas lecturas de porosidades (por encima de 50%), entonces esta curva podría sugerir presencia de hidrógeno. La Fig. 3 ilustra un caso ejemplo de un pozo perforado en Mali, en donde se encontró la presencia de H₂ [2].

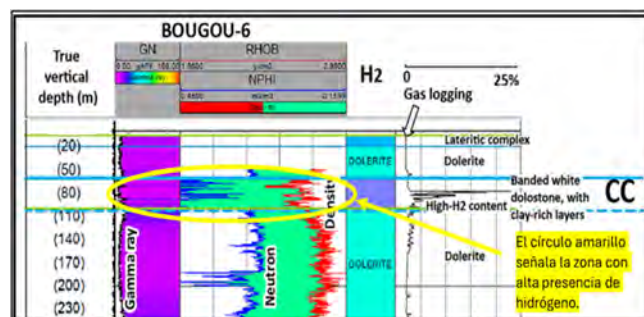


FIGURA 3. Ejemplo de registro geofísico con presencia de hidrógeno encontrado en un pozo petrolero en Mali, África nor-occidental (modificado de [2]).

Se han localizado zonas en México que cuentan con rocas de tipo “ofiolíticas”, el siguiente mapa muestra la localización de los complejos ultramáficos-máficos de México (Fig. 4). Los diversos procesos geológicos ocurridos en nuestro país durante decenas de millones de años han generado rocas ricas en hierro. Muchos de estos procesos están asociados al fenómeno tectónico llamado “zona de subducción” ubicada en el margen costero del Océano Pacífico Sur de nuestro país.



FIGURA 4. Localización de los complejos ultramáficos-máficos de México (límites de los terrenos tectonoestratigráficos [10]).



Algunos pozos analizados presentan manifestaciones de hidrógeno en algunas edades geológicas que pudieran ser de interés para la posible exploración. A continuación, se muestra ejemplo de un pozo en México con posibles manifestaciones de hidrógeno en 1000 a 1100 metros de profundidad (Fig. 5).

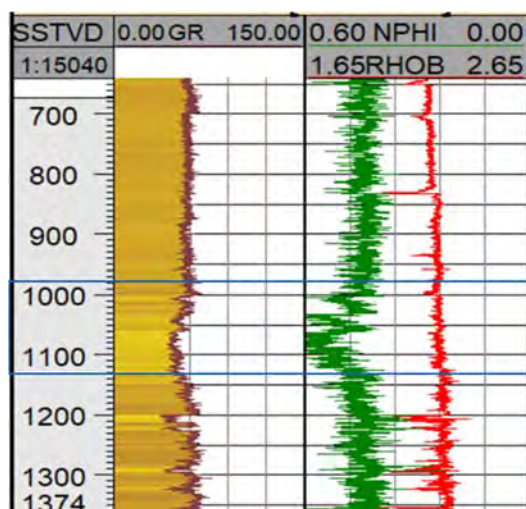


FIGURA 5. Registro geofísico de pozo petrolero donde se puede observar lecturas muy altas de porosidades mediante el registro geofísico de neutrones, lo cual sugiere posible presencia de hidrógeno. La curva del registro de neutrones en color verde presenta muy altas lecturas (mayores a 60 unidades de porosidad), la curva del registro de rayos gamma en color café presenta bajas lecturas de radiactividad (la cual indica baja cantidad de arcilla). Estas lecturas suceden entre los metros 1000 y 1100 de profundidad.

3. CONCLUSIONES

En la exploración de hidrógeno geológico se están desarrollando nuevos métodos y se está extendiendo el uso de otros tradicionales empleados rutinariamente en la exploración de hidrocarburos, como son los registros geofísicos de pozos, sin embargo, su efectividad mejorará a medida que evolucione el conocimiento sobre la génesis del hidrógeno natural.

Potencialmente se espera que existan yacimientos de hidrógeno geológico, análogos a los existentes de gas natural, esperando que contengan cantidades comercialmente atractivas de hidrógeno atrapado a alta presión. Sin embargo, hasta el momento, no se han reportado ni confirmado, por lo que es necesario fortalecer el conocimiento alrededor de los

sistemas de hidrógeno natural (geológico) en el subsuelo, para entender sus procesos de generación, migración, entrapamiento y retención en el yacimiento, así como mejorar la predictibilidad de este tipo de yacimientos.

No todas las regiones de México con rocas ultramáficas son aptas para la presencia de hidrógeno blanco, se está trabajando en la selección de las mejores zonas. La investigación y exploración de este recurso energético está en una fase activa y prometedora, con un enfoque claro en la identificación de acumulaciones viables y la superación de los desafíos técnicos para su producción a escala comercial.

La exploración, en búsqueda de este recurso energético, se orienta hacia la identificación de indicadores como los círculos de hadas y la inferencia de escenarios de acumulación. Aunque se espera que el hidrógeno blanco tenga un costo de producción muy bajo y una huella de carbono insignificante, aún no existen yacimientos comerciales generalizados más allá del de Malí. Las trampas tradicionales podrían requerir un tamaño considerable debido a su menor compresibilidad, si bien algunos conceptos sugieren la posibilidad de carga continua que no requiere un sello tradicional. La actividad microbiana puede afectar el flujo. El debate científico actual se centra en dónde se acumula y dónde el flujo es suficiente para la producción comercial, más que en su existencia.

El presente trabajo forma parte de una investigación para obtener el grado de Doctor en Energía, dicha investigación tendrá resultados más claros a medida que avance.

REFERENCIAS

- [1]. Velásquez Piedrahíta, Juan David, and John Fredy Quiceno Castañeda. "Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis." (2013).
- [2]. Maiga, Omar, et al. "Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali." *Scientific Reports* 13.1 (2023): 11876.
- [3]. Moretti, Isabelle, et al. "The H₆⁺ potential of the Colombian coals in natural conditions." *International Journal of Hydrogen Energy* 77 (2024): 1443-1456.
- [4]. Carrillo Ramirez, Alejandra, et al. "Natural H₂ Emissions in Colombian Ophiolites: First Findings." *Geosciences* 13.12 (2023): 358.





- [5]. Moores, E. M., and Frederick John Vine. "The Troodos Massif, Cyprus and other ophiolites as oceanic crust: evaluation and implications." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 268.1192 (1971): 443-467.
- [6]. McCollom, Thomas M., and Wolfgang Bach. "Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73.3 (2009): 856-875.
- [7]. Mével, Catherine. "Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges." *Comptes Rendus Geoscience* 335.10-11 (2003): 825-852.
- [8]. Gregory, Simon P., et al. "Subsurface microbial hydrogen cycling: Natural occurrence and implications for industry." *Microorganisms* 7.2 (2019): 53.
- [9]. Gass, Ian G. "Volcanic processes in ore genesis." *Journal of the Geological Society* 132.5 (1976): 563-575.
- [10]. Sedlock, Richard L., Fernando Ortega-Gutiérrez, and Robert C. Speed. "Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico." (1993).
- [11]. Davies, K., Josse, R., Frery, E., Esteban, L., Keshavarz, A., & Iglauer, S. (2025). Distinguishing drilling-induced artifacts from naturally occurring hydrogen in soil gas surveys.



M. C. Luis Ángel Valencia Flores. Ingeniero Geólogo y Maestro en Ciencias en Geología, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura-Unidad Ticomán, Ciencias de la Tierra, del Instituto Politécnico Nacional. Cuenta con 25 años de experiencia. Ha trabajado en el Instituto Mexicano del Petróleo, Petróleos Mexicanos, Schlumberger, Paradigm Geophysical, Comisión Nacional de Hidrocarburos, Aspect Energy Holdings LLC,

Facultad de Ingeniería de la UNAM, actualmente es académico del Instituto Politécnico Nacional (posgrado y licenciatura) donde imparte asignaturas especializadas en la caracterización de yacimientos petroleros. Es estudiante del Doctorado en Energía en el IPN, especializándose en la exploración de Hidrógeno Natural y fuentes alternas de energías.





Una propuesta de política pública para fortalecer la formación de recursos humanos en el área de la energía nuclear

ARMANDO M. GÓMEZ TORRES¹, JUAN LUIS FRANCOIS LACOUTURE²,
EDMUNDO DEL VALLE GALLEGOS³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carretera México Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, Estado de México, C.P. 52750, México

²Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, C.U., C.P. 04510, CDMX, México

³Instituto Politécnico Nacional, Av. IPN S/N, Alc. Gustavo A. Madero, C.P. 07738, CDMX, México

Autor de Correspondencia: Armando M. Gómez Torres (e-mail: armando.gomez@inin.gob.mx).

RESUMEN De acuerdo con las últimas proyecciones de la Agencia Internacional de Energía, se espera que la demanda de energía eléctrica en el mundo crezca en los siguientes años a un ritmo de 3.4% anual para apoyar en las tareas de descarbonización, tomando en cuenta nuevos actores altamente consumidores de electricidad como los motores de inteligencia artificial y el sector de las criptomonedas, entre otros. Los países más desarrollados coinciden en que la energía nuclear (EN) debe formar parte de sus portafolios energéticos y sus proyecciones de crecimiento en el sector eléctrico. En México, en la década de los 90, comenzó a operar la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV). La mayoría de los recursos humanos (RRHH) que participaron en su construcción, puesta en marcha y operación se formaron en las universidades públicas mexicanas, en las que se diseñaron programas académicos para apoyar a la industria nuclear mexicana. Sin embargo, después de más de 30 años, mucha de la capacidad, en cuanto a personal especializado en temas de ingeniería nuclear, se ha ido perdiendo. Actualmente, el país cuenta con un reducido número de programas académicos relacionados con la Ingeniería Nuclear. Se podría decir que actualmente el país satisface, en el límite, la demanda de RRHH; no obstante, si el país decidiera construir una nueva planta nuclear, las instituciones tendrían que trabajar a marchas forzadas para intentar cumplir tal demanda. Incluso si se tomara la decisión de no expandir el programa nuclear mexicano, la CNLV seguirá operando por al menos 30 años más. Además, se tiene que continuar con la gestión de residuos nucleares y el desarrollo de las diversas aplicaciones de la EN. Lo anterior, aunado a la necesidad de preservar la vasta reserva de conocimiento y experiencia acumulados durante décadas de investigación y aplicaciones, demandará la continuación y extensión de programas educativos acordes con estas necesidades. En el presente trabajo, se propone, con base en las recomendaciones de organismos internacionales, los pasos

iniciales para definir una estrategia para fortalecer las políticas públicas en el tema de la formación de RRHH y la adecuada transferencia de conocimiento en el área nuclear.

PALABRAS CLAVE: Formación de Recursos Humanos, Políticas públicas, Reactores Nucleares.

1. INTRODUCCIÓN

Ya han pasado varios años desde que se efectuó la construcción de una central nuclear en México y mucha de la capacidad en cuanto a personal, tanto dentro de instituciones gubernamentales como privadas, se ha perdido. La mayoría de los RRHH en puestos clave se formaron en las universidades mexicanas, la mayoría de ellas públicas, en las que se diseñaron programas académicos para apoyar a la industria nuclear mexicana.

A pesar del estancamiento que tuvo la energía nuclear a partir de finales de la década de los setenta, los avances en materia tecnológica y científica en este campo no se han detenido y actualmente se cuenta con diseños licenciados y construidos de reactores nucleares de Tercera Generación. Por su parte, la Cuarta Generación de reactores nucleares, se encuentra en una etapa avanzada de diseño, e incluso, ya están siendo construidos algunos prototipos. Sin embargo, el mundo se enfrenta a la problemática relacionada con la transferencia adecuada de conocimiento, habilidades y experiencias y en México no es la excepción. El país tendría que invertir en el corto y mediano plazo en esta tecnología para satisfacer su demanda energética, diversificar su portafolio energético, para no depender tanto de los hidrocarburos, y para contribuir a los esfuerzos mundiales por detener el calentamiento del planeta.





Actualmente, México cuenta con un reducido número de programas académicos relacionados con la Ingeniería Nuclear, que, a pesar de estar limitados de recursos, se han distinguido por la formación de RRHH capacitados y competitivos. Dentro de las instituciones con programas relacionados con el campo nuclear se cuenta con diferentes tipos de instituciones académicas de nivel superior y de posgrado, destacando el antiguo y desaparecido Departamento de Ingeniería Nuclear, cuyo personal fue adscrito al Departamento de Física de la Escuela Superior de Física y Matemáticas (ESFM) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), y las Facultades de Química y de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En estas instituciones educativas se ha generado la mayor cantidad de RRHH (histórica) en el campo de la ingeniería nuclear. Además, se cuenta con programas nucleares más recientes como los desarrollados en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), y en algún momento también existió un programa a nivel posgrado en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). De entre las instituciones mencionadas con anterioridad, la UAM, la UNAM y el IPN son las únicas instituciones del país que ofrecen estudios a nivel de licenciatura desde hace varias décadas. Finalmente, debido a la influencia de la CNLV en su zona geográfica, la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Veracruzana, campus Xalapa, ha contribuido, de manera limitada, a la formación de RRHH en el campo nuclear, incluyendo algunas materias y líneas de estudio en reactores nucleares. Más recientemente, varias instituciones públicas han impulsado temas nucleares también en nuevos programas de estudio, como la ingeniería en energía, que incluye temas relacionados con la nucleoelectricidad. Finalmente, la contratación en instituciones privadas de diversos egresados de las escuelas públicas con programas nucleares ha resultado en que en algunas universidades privadas se exploren también los temas nucleares y se comiencen a abrir líneas de investigación (Tecnológico de Monterrey, Ibero, etc.).

Con base en lo anterior, se podría decir que actualmente el país satisface, en el límite, la demanda de RRHH en el campo nuclear, no obstante, si el país decidiera construir una nueva planta nuclear de potencia, se necesitaría una cantidad considerable de RRHH capacitados en el área nuclear, por lo que las instituciones tendrían que trabajar a marchas forzadas para cumplir tal demanda y sería lamentable, no estar a la altura de este reto. Por lo anterior, una eventual expansión del programa nuclear mexicano deberá poner especial atención en el fortalecimiento de las instituciones educativas de nivel superior y de posgrado para formar una nueva

generación de expertos en ingeniería nuclear que pueda hacer frente al reto que esta expansión implica. Para lograr dicho objetivo, un programa de expansión del sector nucleoelectrico en México deberá ir acompañado de un plan de acción para la formación de RRHH bien capacitados y suficientes.

Incluso, si en el país se tomara la decisión de eliminar progresivamente el uso de la energía nuclear para la generación comercial de electricidad, la reorganización de responsabilidades en la gestión de residuos nucleares y el continuo desarrollo de la protección radiológica y las diversas aplicaciones, aunado a la necesidad de preservar su vasta reserva de conocimiento y experiencia acumulados durante décadas de investigación y aplicaciones en diversos ámbitos de la ingeniería nuclear, demandaría la continuación y extensión de programas educativos acordes con estas necesidades.

Para definir un plan de acción, el país no debe partir de cero ni inventar el hilo negro, los organismos internacionales que coordinan los esfuerzos globales relacionados con la energía nuclear, han establecido rutas claras para poder diseñar las estrategias necesarias para tener éxito en la misión. En las siguientes secciones se desarrollará este tema, partiendo de la situación actual en México.

2. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

El tiempo de vida de la industria nuclear es similar al de cualquier otra industria. En efecto, para la mayoría de las formas de actividad humana, el ciclo de vida está dado por las siguientes etapas: nacimiento, crecimiento, madurez, declive, renacimiento y renovación o muerte. Las industrias del siglo diecinueve tales como la ferrocarrilera, la manufacturera química o la producción de acero han experimentado el ciclo completo, mientras que industrias como la espacial, la aviación y la nuclear han recorrido sólo una parte del ciclo. Dependiendo del desarrollo económico y de las necesidades económicas, es en donde se encuentra, dentro del ciclo de vida, un sector industrial de un país. Para la industria nuclear, algunos países están en la etapa de maduración; algunos han entrado a la etapa de declive y están analizando la renovación o el cierre de la industria; otros están apenas empezando con la construcción de plantas nucleares.

Aunque el ciclo de vida puede ser un factor común de la actividad industrial, cada industria tiene su propio distintivo, características únicas que la hacen diferente de las otras. El sector de energía nuclear se caracteriza por escalas grandes de tiempo y excelencia técnica. Las primeras plantas





nucleares se diseñaron para operar por 30 años; hoy el tiempo de vida esperado es de 50 a 60 años. Cuando una planta nuclear se cierra, el proceso de desmantelamiento y descontaminación puede durar tanto como el tiempo que operó, o posiblemente más. Desde el inicio hasta el final pueden ser hasta 100 años. La rápida evolución técnica de la industria no hubiera sido posible sin los innumerables programas de alta calidad en educación, investigación y desarrollo.

A través de tales programas, y a través de las ligas asociadas con las universidades e institutos de investigación, se ha obtenido no sólo conocimiento técnico sino también el personal técnico competente necesario para el desenvolvimiento seguro de la industria. Como resultado de estas facetas de grandes escalas de tiempo y competencia técnica esencial, la industria encara hoy en día dos problemas: cómo retener las habilidades y competencias existentes para los más de 50 años que una planta opera cuando la industria en ese país puede estar en una posición de madurez o declive en el ciclo de vida y no se tiene considerada la construcción de más plantas y cómo desarrollar y retener las habilidades y competencias nuevas en las áreas de desmantelamiento y manejo de desechos radioactivos cuando estos últimos son vistos como actividades de ocaso y no son atractivas para mucha gente joven.

Estos problemas se han exacerbado por la disminución de regulaciones del mercado energético en todo el mundo. Actualmente se ha requerido que la industria nuclear reduzca sus costos dramáticamente para competir con generadores que tienen diferentes perfiles de ciclo de vida tecnológico. En muchos países, los fondos gubernamentales de apoyo al campo nuclear se han reducido dramáticamente o han desaparecido por completo, mientras que los márgenes de beneficio de la industria nuclear han sido severamente exprimidos. El resultado ha sido precios de electricidad más bajos, pero, a su vez, la pérdida de experiencia como resultado de reducir los salarios, la pérdida de instalaciones de investigación para reducir los costos de operación y un declive en el apoyo a las universidades contemplando una reducción de gastos generales.

Todo esto ha llevado a una reducción en la innovación técnica y una pérdida de competencia y habilidades técnicas. Sin embargo, debido a que diferentes países están en distintas etapas en el ciclo de vida de la tecnología nuclear, estas pérdidas no son comunes para todos los países, ya sea en su naturaleza o en su extensión; una competencia que puede haber declinado o pudo perderse en un país puede ser fuerte

en otro. Y en eso recae la solución a los problemas que el sector encara: la colaboración internacional.

3. UNA MIRADA A LAS ESTRATEGIAS INTERNACIONALES PARA EL DESARROLLO DE COMPETENCIA NUCLEAR

La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, por sus siglas en inglés) ha realizado estudios sobre la educación y el entrenamiento en materia nuclear, los cuales se han llevado a cabo para considerar las preocupaciones de los países miembros de la OECD relacionados con la disminución en la educación y el entrenamiento nuclear.

El punto de partida es reconocer el importante rol que ha jugado la energía nuclear en la producción de electricidad en el pasado y en la actualidad. A finales de 2024, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), reportó 416 reactores conectados a la red eléctrica, con una capacidad acumulada de 374,531 MWe instalados y una producción de electricidad, reportada en 2023, de 2552 TWh. Actualmente están en construcción 63 reactores nucleares en 15 países, lo que supondrá una adición de aproximadamente 66 GWe de capacidad instalada. De los reactores en construcción, 29 están en China, seguidos por India (7 reactores), Rusia, Turquía y Egipto con 4 reactores cada uno en construcción, entre otros. Lo que da cuenta de que el mundo sigue desarrollando proyectos nucleares a gran escala y, por consiguiente, seguirá siendo necesario contar con los RRHH que hagan frente a este crecimiento. Con base en lo anterior, es importante visualizar que, aun en países que no tienen planes de construir más reactores nucleares o, incluso aquellos que han decidido terminar con su programa nuclear, se seguirá necesitando gente calificada para operar las plantas existentes y las instalaciones de ciclo de combustible (muchas de las cuales operarán por décadas), de manejo de desechos radioactivos, y la preparación para el desmantelamiento futuro de las plantas existentes. Por lo tanto, en la actualidad y en las generaciones venideras, estas actividades requerirán expertos en ingeniería y ciencia nuclear si se desea mantener la seguridad y la protección ambiental que caracterizan a la tecnología nuclear.

Resulta esencial contar con una amplia y profunda capacidad de educación en el campo nuclear que resulte competente y suficiente para cubrir los requerimientos particulares de la política energética del país y, con mayor razón, si ésta implica la extensión del programa nuclear mexicano. Las universidades y las escuelas técnicas avanzadas son las únicas instituciones capaces de proporcionar esta educación con los fundamentos básicos





que se requieren. Además, el entrenamiento “en sitio” resulta ser una forma complementaria de educación que es importante para la operación propia y acertada de las instalaciones nucleares. Este tipo de educación es, en su mayoría, aunque no exclusivamente, proporcionado por la industria y los institutos de investigación.

Dado que los RRHH son uno de los elementos más importantes para los diferentes tipos de aplicaciones nucleares, se deben hacer esfuerzos significativos para atraer a un número suficiente de estudiantes brillantes, interesados en el campo nuclear y que estén dispuestos a hacer investigación para la utilización de la tecnología nuclear en la actualidad y a futuro. La captación, a tiempo, de una nueva generación de RRHH es fundamental para tener la transferencia de conocimiento adecuada y optimizada. Si se falla en tal transferencia a nivel global, se corre el riesgo de perder la parte sustancial de la tecnología nuclear. Aunque el número de científicos nucleares parece ser suficiente en la actualidad, en algunos países hay indicadores de que la experiencia futura está en riesgo. Por lo tanto, si los gobiernos, la industria y la academia fallan en actuar en respuesta a estos indicadores, la industria nuclear estará en serias complicaciones en un futuro no muy lejano. Al respecto, los países miembros de la OECD han identificado esta “emergencia” relacionada con la escasez de experiencia nuclear y transferencia de conocimiento, y, se han comenzado a trazar rutas de “salvación” con la finalidad de tomar acción antes de que lleguen tiempos críticos.

3.1. La educación y el entrenamiento nuclear: ¿Un caso de preocupación?

El primer paso que dio la comunidad internacional que forma parte de la OECD, incluyendo a México, fue identificar si la educación y el entrenamiento en materia nuclear estaban en crisis y si había un motivo de preocupación. Se trabajó en un documento titulado: “¿Nuclear education and training, cause of concern?” [1]. Este informe es un resumen del estudio que se llevó a cabo para tomar en cuenta las preocupaciones planteadas por los países miembros de la OECD de que la educación y la capacitación en el campo nuclear estaban disminuyendo, tal vez a niveles problemáticos. En el documento se reconoce que la humanidad ahora disfruta de muchos beneficios de la tecnología relacionados con la energía nuclear en áreas tan diversas como la medicina y los materiales avanzados, así como la producción de electricidad. Hoy en día, la tecnología nuclear está muy extendida y es multidisciplinaria. Sin embargo, el avance de esta tecnología, con todos sus beneficios asociados, se verá amenazado, o incluso restringido, a menos que se haga algo en contra del número cada vez menor de cursos

universitarios asociados con ella y el interés cada vez menor entre los estudiantes.

En la mayoría de los países hay ahora menos programas integrales de tecnología nuclear de alta calidad en las universidades que en décadas anteriores (ya hemos visto a detalle el caso de México). La capacidad de las universidades para atraer estudiantes de alta calidad a esos programas, satisfacer las futuras necesidades de personal de la industria nuclear y realizar investigaciones de vanguardia en temas nucleares se está viendo seriamente comprometida, pues, además, las plantillas de profesores han disminuido drásticamente sin que los lugares que quedan sean oportunamente reemplazados.

Así, existen varias preocupaciones:

- El número cada vez menor y la dilución de los programas nucleares.
- El número cada vez menor de estudiantes que cursan materias nucleares.
- La falta de profesores jóvenes para reemplazar a los profesores que envejecen y se jubilan.
- Instalaciones de investigación envejecidas, que están siendo cerradas y no reemplazadas.
- La fracción significativa de graduados nucleares que no ingresa a la industria nuclear, ni al área académica ni de investigación nuclear nacional o internacional

Actualmente parece haber “suficientes” formadores y personal de calidad en la industria y en los institutos de investigación. Sin embargo, la disponibilidad de formadores adecuados en un futuro próximo se está convirtiendo en una preocupación debido a la situación universitaria.

La percepción de los estudiantes, un factor importante que contribuye a la baja matrícula, se ve afectada por las circunstancias educativas, la percepción pública negativa, la reducción de la industria y las reducciones en los programas nucleares financiados por el gobierno, donde se está realizando poca planificación estratégica. La baja matrícula afecta directamente a los presupuestos y los recortes presupuestarios limitan las instalaciones disponibles para los programas nucleares. A menos que se haga algo para detenerlo, esta espiral descendente de disminución del interés de los estudiantes y de las oportunidades académicas continuará.

Una amplia gama de iniciativas para alentar a las generaciones más jóvenes a incorporarse al campo nuclear ha tenido gran éxito. Sin embargo, éstas suelen ser adoptadas por individuos y no por organizaciones, es decir, en el mundo





hay pocas iniciativas nacionales que impliquen el desarrollo de políticas educativas nucleares. Los gobiernos son responsables de hacer lo que es claramente de interés nacional a largo plazo de sus países, especialmente en áreas donde de otra manera no se tomarían las acciones necesarias sin el gobierno. Tienen un importante papel multifacético en el campo nuclear: gestionar la empresa nuclear existente, preservar la energía nuclear como una opción a largo plazo, sostener la influencia internacional en materia de seguridad nuclear, tecnológica y física y mejorar la competitividad tecnológica.

Así pues, en este estudio se concluye que, si no se toman las medidas apropiadas ahora, se pondrá en grave peligro la provisión de conocimientos especializados adecuados en el futuro. El plan de actuación que se sugiere en este estudio de la OECD se basa en las siguientes recomendaciones:

1. Papel estratégico de los gobiernos: la planificación energética estratégica debe incluir la consideración de la educación, la mano de obra y la infraestructura. Deberán contribuir a la planificación integrada para garantizar que los RRHH estén disponibles para cumplir con las obligaciones necesarias y abordar las cuestiones pendientes. La planificación deberá apoyar, a los jóvenes estudiantes y proporcionar recursos adecuados para programas dinámicos de investigación y desarrollo nuclear, incluida la modernización de las instalaciones. Se deberán sentar las bases para el desarrollo de redes o puentes educativos entre universidades, industrias e institutos de investigación.

2. Los desafíos de revitalizar la educación nuclear desde la universidad: se deberán proporcionar programas educativos básicos y atractivos. Interactuar temprano y frecuentemente con estudiantes potenciales, tanto hombres como mujeres, y brindar información adecuada.

3. Investigación vigorosa y mantenimiento de una formación de alta calidad: proporcionar programas de formación rigurosos para satisfacer necesidades específicas. Desarrollar proyectos de investigación interesantes para satisfacer las necesidades de la industria y atraer estudiantes y empleados de calidad (institutos de investigación).

4. Beneficios de colaborar y compartir mejores prácticas: la industria, los institutos de investigación y las universidades deben trabajar juntos para coordinar mejor los esfuerzos para alentar a la generación más joven. Se deberá desarrollar y promover un programa de colaboración en educación y capacitación nuclear, y proporcionar un mecanismo para compartir mejores prácticas en la

promoción de cursos nucleares entre los países miembros de la OECD.

3.2. Plan de desarrollo de competencia nuclear de la OECD

Con base en las recomendaciones anteriores, la OECD realizó un documento para el desarrollo de competencia nuclear [2], presentando varios puntos que se deberían implementar en la parte educativa hacia una ruta que impulse un programa de expansión nuclear. A pesar de la situación ambivalente con respecto a la energía nuclear, donde algunos países han decidido construir nuevos reactores, algunos dudan y otros confiesan su intención de eliminar gradualmente las instalaciones nucleares, se reconoce que la energía nuclear sigue representando una proporción importante de la capacidad instalada en todo el mundo, particularmente en los países miembros de la OECD. Además, la tecnología nuclear va mucho más allá de la producción de electricidad, cubriendo una amplia gama de aplicaciones, desde el diagnóstico y tratamientos médicos hasta el examen y prueba de materiales. Con esta visión holística en mente, la OECD hace las siguientes recomendaciones para ayudar a preservar y desarrollar las competencias nucleares, sin importar cuáles puedan ser sus aplicaciones pacíficas en última instancia:

1. Imitar las buenas prácticas de otros países para mejorar sus programas internos: si bien todos los países han logrado avances, muy a menudo esto se ha logrado a través de la extensión y el desarrollo lógicos de las actividades existentes. Tomar prestadas ideas de otros países bien podría ser el camino para complementar y maximizar la eficacia de la actividad interna.

2. Ampliar la base de conocimientos a través de iniciativas nacionales e internacionales: si bien habilidades y competencias específicas pueden estar amenazadas en un país, pueden estar mucho más seguras en otro. Para conservar todas las habilidades y competencias nucleares que necesita la industria, será necesario un mayor grado de colaboración internacional que el que se tiene hasta ahora.

3. Los gobiernos, el mundo académico, la industria y las organizaciones de investigación deberían colaborar tanto a nivel nacional como internacional para asegurar el acceso a conocimientos nucleares esenciales: el uso seguro y eficiente de la energía nuclear exige un cierto número de expertos en áreas nucleares específicas, como: ingeniería de reactores nucleares, física de reactores, química nuclear y la protección radiológica. Dado que el número necesario de





expertos en estas disciplinas esenciales puede ser pequeño en algunos países, existe el peligro de que desaparezca la oferta educativa necesaria para proporcionarlos. Por lo tanto, existe la necesidad de que el gobierno, la academia, la industria y las organizaciones de investigación colaboren entre sí para asegurar grupos sostenibles de experiencia. Los gobiernos deben proporcionar la dirección estratégica que garantice que se obtengan suficientes recursos educativos en áreas críticas específicas de la energía nuclear. Cuando los conocimientos especializados esenciales no están disponibles en un país, entonces se debe buscar el acceso a su prestación en otro país.

4. Garantizar que la oferta y la demanda estén lo más equilibradas posible, realizando una evaluación periódica de la mano de obra: las necesidades de mano de obra y competencia del sector nuclear de cualquier país cambiarán gradualmente. Las encuestas sobre mano de obra ayudan a garantizar que la oferta satisfaga la demanda. Identificar áreas en las que la contratación está siendo difícil y hablar con responsables de contratación en empresas y organizaciones nucleares ayudaría a las universidades e instituciones de formación a desarrollar los cursos adecuados.

5. Las organizaciones industriales y de investigación deberían aumentar su interacción con los departamentos de ciencia e ingeniería de las universidades para elevar el perfil de la industria nuclear de modo que más estudiantes la consideren al decidir sus opciones profesionales: ahora que la industria nuclear enfrenta una feroz competencia de otras ciencias, ingeniería y tecnología, corresponde a quienes trabajan en ellas presentar los desafíos y oportunidades que el sector tiene para ofrecer. Un grupo objetivo particularmente importante son aquellos que están a punto de elegir una carrera profesional o una especialización universitaria.

6. No se debe permitir que la financiación pública para la Investigación y Desarrollo en materia nuclear disminuya hasta el punto de poner en peligro la retención de habilidades y competencias: el tema subyacente de la financiación pública o de la financiación públicamente controlada, en todos los países, es la necesidad de mantener las habilidades y competencias básicas. Sin embargo, dado que la financiación pública ha disminuido en la mayoría de los países en los últimos años, esta responsabilidad ha recaído cada vez más en la industria. El peligro es que la industria se centre estrictamente en aquellas habilidades y competencias que necesita en el corto plazo. Se necesita una planificación estratégica para dar cabida a las necesidades a

más largo plazo y esto sólo puede llevarse a cabo con planeación estratégica gubernamental.

7. Los responsables de financiar la investigación y el desarrollo nucleares deberían tratar de garantizar que los aspectos de educación y capacitación sean parte integral de las actividades: en algunos países, la financiación de la investigación nuclear se aborda de forma aislada de la financiación de la enseñanza nuclear dentro de la misma universidad. En otros países se reconoce que la buena enseñanza e investigación van juntas y se adopta un enfoque más integrado de financiación. Es más probable que una buena investigación genere una buena enseñanza y no al revés.

8. Una combinación de financiación industrial y pública parecería un camino apropiado a seguir: los países no pueden llevar adelante sus programas nucleares sin algún compromiso con la industria en general. Dado que los beneficios serán tanto a nivel nacional como empresarial, parece apropiado que una combinación de financiación pública y de la industria apoye los esfuerzos en esta área.

9. El gobierno, la industria y el mundo académico deberían trabajar juntos para crear un marco funcional que apoye la educación y la capacitación a través de la colaboración nacional e internacional: se deberán fortalecer los programas de capacitación y colaboración internacionales en el tema.

10. La NEA (Nuclear Energy Agency) de la OECD y otras agencias internacionales deberían facilitar la transferibilidad de la educación y las habilidades entre los países miembros, especialmente en disciplinas nucleares críticas específicas: la fortaleza de organizaciones internacionales como la NEA y el OIEA reside en su capacidad para crear y asegurar marcos en los que los países miembros puedan trabajar juntos y colaborar. Ya se han logrado muchos avances en las áreas de educación, capacitación e investigación nucleares y, para continuar, se debe mantener la responsabilidad de estas organizaciones para facilitar las colaboraciones.

4. UNA RUTA PARA MÉXICO

Sin lugar a dudas, las escuelas de nivel superior y de posgrado nacionales se han distinguido por la formación de RRHH altamente capacitados que han mantenido vivo el campo nuclear por varias décadas. Sin embargo, algunas escuelas se han visto seriamente amenazadas por la falta de RRHH. En México son muchos los responsables de que el campo nuclear siga funcionando tan bien como hasta ahora





y se tiene que trabajar en equipo para mantener la opción nuclear en los altos niveles que la han caracterizado durante años.

En diversos foros y como resultado de varias mesas de discusión entre los principales responsables de los programas educativos sobre energía nuclear en México, se han identificado varias acciones que, por supuesto, tendrán que estar soportadas por apoyos gubernamentales adecuados, considerando que las escuelas públicas son los pilares de la formación de RRHH nucleares en México. En un trabajo anterior [3] y en un esfuerzo sin precedentes, se plantearon una serie de recomendaciones a todos los actores nacionales que tienen que ver con el campo nuclear, principalmente con el aspecto relacionado con la producción de energía eléctrica. En este documento, y a manera de conclusión, se actualizan las recomendaciones enfocando el esfuerzo a la definición de una ruta nuclear que extienda el programa nuclear nacional o, al menos, que lo mantenga en operación hasta que las centrales nucleares cumplan con su ciclo de operación y se resuelva de fondo el tema de la administración y resguardo seguro de los combustibles nucleares gastados, para el caso de que se decida optar por la implementación de un ciclo de combustible abierto.

5. CONCLUSIONES

1. **Construcción de nuevas plantas nucleares:** El Gobierno Mexicano deberá pronunciarse en el corto plazo a favor de continuar y aumentar la capacidad energética nuclear para el abastecimiento seguro y limpio de electricidad. Un análisis comprensivo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés) para las diferentes cadenas de generación de electricidad muestra que la energía nuclear es una de las tecnologías de generación menos intensiva en la producción de carbono, con emisiones de la cadena completa de energía de únicamente 2.5 – 5.7 gramos de GHG (expresados como gramos equivalentes de Carbono) por kWh de electricidad producida (gCeQ/kWh), comparados con los 105 a 366 gCeQ/kWh para las cadenas de combustibles fósiles y 2.5 – 76 gCeQ/kWh para las cadenas de energía renovables [4].
2. **Apoyos a las escuelas con programas nucleares:** El Gobierno Mexicano deberá identificar lo importante que será contar con una cantidad suficiente y bien capacitada de RRHH que puedan satisfacer la demanda futura tomando en cuenta que los promedios de edad de los principales centros de enseñanza del país así como de la industria nuclear nacional son elevados y que gran parte de los profesionistas que han trabajado arduamente en el

campo nuclear están a punto de retirarse, por lo que el apoyo a los centros educativos debe hacerse ahora tomando en cuenta los años de estudio que le tomará a un joven finalizar su carrera. El rol del Gobierno Mexicano en este punto deberá estar de la mano con los directivos y catedráticos de las instituciones educativas que ofrecen programas nucleares. En este sentido, los profesores y administrativos escolares deberán hacer una labor de convencimiento basada en hechos para conseguir reasignaciones presupuestales para la promoción masiva de los programas nucleares, así como para el desarrollo de proyectos de investigación, la actualización y modernización de laboratorios y las oportunidades de entrenamiento en la industria nuclear nacional e internacional.

3. **Renovación y Mantenimiento de Plantilla de Profesores:** Se deberán diseñar estrategias para identificar jóvenes brillantes que puedan continuar con la labor en el ámbito académico. Para lo cual será importante contar con ofertas laborales atractivas que incluyan periodos de perfeccionamiento (becas para la realización de doctorados), y que a su vez comprometan a los jóvenes talentosos a continuar con las labores de docencia necesarias.
4. **Proyectos comunes y multidisciplinarios entre escuelas:** Es interesante ver grandes desarrollos académicos en las escuelas nacionales, sin embargo, pocas veces se dan proyectos que incluyan un trabajo de colaboración entre dos o más escuelas. Las Universidades y Escuelas Superiores tienen que trabajar más en conjunto. En ese sentido, mucho se podría ganar si la infraestructura de las escuelas es compartida, así como también la capacidad intelectual de los profesores. Además, esto conllevaría ahorros relacionados directamente con los gastos en infraestructura, lo cual daría muestras de colaboración entre las escuelas y el gobierno. Un caso de éxito a este respecto es el proyecto nacional AZTLAN platform [5] en el que se desarrolla, en una colaboración entre la UNAM, el IPN, la UAM y el ININ, la plataforma mexicana para el análisis y diseño de reactores nucleares. En este proyecto se ha formado a más de 30 jóvenes: ingenieros, maestros y doctores.
5. **Proyectos comunes entre las escuelas y la industria:** Actualmente sólo existen algunos estudiantes haciendo tesis en el ININ. En este sentido, resulta imperativo que se establezcan vínculos más fuertes amarrados por proyectos comunes entre las universidades, la industria y centros de investigación. Los proyectos conjuntos aumentarían el





número de estudiantes interesados en desarrollar tesis basadas en las experiencias que puedan ganar ya sea en un centro de investigación o en una planta nuclear. Al respecto, la industria deberá realizar esfuerzos para poder ofrecer una oferta laboral a los jóvenes que demuestren brillantez en el desarrollo de sus proyectos.

6. **Bolsa de trabajo:** Un aspecto muy importante para los jóvenes en su decisión de carrera universitaria es la oferta laboral que puedan encontrar al egresar. Escuelas, industria, centros de investigación, sociedades relacionadas con el campo nuclear y gobierno tienen que trabajar en conjunto para renovar y mantener fuentes de trabajo para los estudiantes que egresan de las escuelas. Desde estudiantes que renueven la plantilla de profesores hasta estudiantes que queden contratados en los centros de investigación o en las plantas nucleares actuales y que se construyan a futuro. Para esto es imperativa la comunicación, por ejemplo, la planta nuclear debe saber exactamente cuántos estudiantes capacitados y en qué áreas se tienen en las escuelas, pues estos mismos deberán ser el semillero directo de la planta, lo que le ahorraría capacitación especial para ingenieros afines a otras áreas y que deseen ingresar a la planta.

7. **Difusión y comunicación:** Es muy necesario que el país adopte una cultura nuclear y que se identifiquen todos los beneficios de esta fuente de energía. Se deben establecer planes de acción mediante los cuales las bondades de la energía nuclear lleguen a todos los sectores de la población mexicana. Actualmente en México no existe una cultura nuclear apropiada y son los mismos tomadores de decisiones los que no conocen las ventajas del uso de la energía nuclear para beneficio del país.

8. **Colaboración Internacional:** Los centros educativos nacionales deberán establecer acuerdos con los de otros países, en particular de aquellos países en los que han resurgido sus programas nucleares. Es imperativo que, tanto el OIEA como la NEA se tomen como apoyos sólidos para la toma de decisiones y como una guía en los pasos a seguir para la reactivación absoluta del campo nuclear y la producción de RRHH. El campo nuclear mexicano deberá aprovechar todos los proyectos de cooperación técnica y cursos de especialización que ofrecen estos organismos internacionales para mantenerse a la vanguardia de los desarrollos más recientes a nivel internacional.

REFERENCIAS

[1]. NEA, OECD, *Nuclear Education and Training, Cause of Concern?*, OECD publications (2000).

[2]. NEA, OECD, *Nuclear Competence Building, Summary Report*, OECD publications, ISBN 92-64-02073-X (2004).

[3]. Armando M. Gómez Torres, et al., *Estrategias para la formación de recursos humanos en el campo nuclear mexicano*, XVIII Congreso Anual de la SNM, 2007.

[4]. NEA, OECD, *Nuclear Power and Climate Change*, OECD publications.

[5]. A. M. Gómez-Torres, F. Puente Espel, E. del Valle Gallegos, J.L. François, C. Martin-del-Campo, G. Espinosa-Paredes, *Mexican platform for analysis and design of nuclear reactors*, in Proc. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP. Niza, Francia, 2015.





Diseño de un sistema de climatización para un estabulado utilizando biomasa como fuente de energía

VICENTE ARMANDO AGUILAR HERNANDEZ^{1*}, JULIO VALLE HERNANDEZ¹,
ROJAS ÁVILA APOLO², ARELLY NICOLE GONZÁLEZ HERNÁNDEZ¹

¹ Escuela Superior de Apan, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Apan-Calpulalpan Km 8. Col. Chimalpa, Apan, Hidalgo, C.P. 43920, MÉXICO.

² Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo. Boulevard de Acceso a Tolcayuca No. 1009. C.P. 43862. Tolcayuca, Hidalgo, México

Autor de Correspondencia: Vicente Armando Aguilar Hernández (e-mail: ag504674@uaeh.edu.mx).

RESUMEN En la producción bovina mantener condiciones ambientales adecuadas es clave para asegurar el bienestar animal y la eficiencia productiva. En muchas regiones de México, el calor excesivo provoca estrés térmico en el ganado, afectando su salud, disminuyendo la ganancia de peso y por consiguiente la producción. Para mitigar este problema, los productores implementan sistemas de climatización los cuales requieren un suministro constante y significativo de energía eléctrica, elevando los costos operativos. Ante este escenario, el uso de biomasa como fuente energética renovable podría ser una solución sustentable, eficiente y económicamente viable. La biomasa, específicamente el estiércol producido diariamente por el ganado genera biogás mediante procesos como la digestión anaerobia al descomponer la materia orgánica. Este biogás puede alimentar generadores eléctricos y calderas para sistemas de climatización, reduciendo el consumo de energía de la red eléctrica.

Este trabajo presenta el diseño de un sistema de climatización para estabulados mediante el uso de biomasa como fuente de energía, con la finalidad de incrementar la eficiencia productiva, reduciendo los costos energéticos y el impacto ambiental. La metodología inicia con un diagnóstico del estabulado para entender las condiciones actuales y el consumo energético requerido para su climatización. Se propone un diseño para el sistema de acondicionamiento a partir del uso de biogás como fuente de alimentación y se realizó una evaluación energética del mismo. Como resultados se presenta un estimando del ahorro de energía, la reducción de emisiones y el costo económico asociados al uso del biogás.

PALABRAS CLAVE: *estrés térmico, climatización, energía renovable, biomasa.*

1. INTRODUCCION

La producción bovina desempeña un papel crucial en la seguridad alimentaria y la economía agropecuaria, proporcionando carne, leche y otros subproductos esenciales para el desarrollo de diversas industrias. Sin embargo, el rendimiento del ganado está directamente influenciado por las condiciones ambientales, particularmente la temperatura y la humedad, donde el bienestar animal se ve comprometido en zonas con climas extremos. El estrés térmico en el ganado bovino es una problemática que incide en su salud, comportamiento y productividad. Las altas temperaturas pueden provocar desequilibrios fisiológicos que afectan la ingesta de alimento, la conversión de energía y la reproducción, generando pérdidas económicas significativas en las explotaciones ganaderas. Para mitigar estos efectos, es esencial implementar estrategias de climatización adaptadas a las necesidades del ganado y a las condiciones ambientales de la región.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema de climatización para estabulados utilizando biomasa como fuente de energía renovable, con el fin de reducir los efectos del estrés térmico en el ganado bovino. La implementación de un sistema de climatización utilizando energías renovables es fundamental, tanto en términos de bienestar animal, en productividad agropecuaria y en la sustentabilidad.

La biomasa, como fuente de energía renovable, representa una alternativa sostenible para alimentar dichos sistemas, ya que, a través del aprovechamiento de residuos orgánicos agropecuarios como estiércol, es posible generar energía térmica o eléctrica que permita operar sistemas u mecanismos





de regulación climática en los estabulados. Esta práctica no solo reduce los costos operativos y la dependencia de fuentes convencionales de energía, sino que también promueve el reciclaje de desechos orgánicos y disminuye la huella de carbono de la actividad ganadera.

Finalmente, se espera que este modelo de climatización basado en biomasa pueda ser replicable en otras zonas con condiciones climáticas similares, ofreciendo una alternativa sostenible y económicamente viable para mejorar el rendimiento productivo del sector ganadero.

2. METODOLOGIA

El diseño del sistema de climatización se realiza en tres etapas; la primera consiste en el dimensionamiento del estabulado y su análisis térmico, posteriormente se realiza la caracterización energética de la biomasa y, finalmente, se propone el sistema de climatización más factible de acuerdo con las características analizadas.

2.1. Dimensionamiento y análisis térmico del estabulado

El diseño del estabulado se plantea para la zona centro-norte de México, más específicamente en el estado de San Luis Potosí, ya que, no solo tiene un clima cálido subhúmedo que justifica técnicamente el uso de sistemas de climatización, sino que también es una entidad con una importante actividad ganadera. Algunos parámetros climáticos de la región, relevantes para el diseño térmico del estabulado, son: temperatura media anual de 24° C, temperaturas máximas en verano de 35° C a 38° C, humedad relativa media de entre el 60% y el 70%, y radiación solar media de 5.5 kWh/m² al día [6].

El estabulado está contemplado para albergar 400 cabezas de ganado, el área total de ocupación y el volumen interior del estabulado, se determinan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$S = N * Au \quad (1)$$

$$V_e = S * h \quad (2)$$

Donde:

S: superficie total del estabulado (m²)

N: número de animales

Au: área por unidad animal (m²)

Ve: volumen del estabulado (m³)

h: altura del estabulado (m)

El análisis térmico se realiza a partir del cálculo de cargas que cuantifican el calor generado dentro del estabulado. Las cargas térmicas por considerar son debido a: el metabolismo del ganado, la presencia humana, la iluminación artificial y la transmisión térmica por envolvente.

2.2. Caracterización energética de la biomasa

La obtención de biogás se basa en un proceso de digestión anaerobia, es decir, la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno, llevada a cabo por comunidades de bacterias especializadas (hidrolíticas, ácido génicas, acetogénicas y metanogénicas). El biogás resultante es una mezcla rica en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), con trazas de H₂S, H₂ y vapor de agua, y puede ser utilizado como combustible energético o para la generación de electricidad.

Para el análisis, se consideró un digestor tubular semicontinuo, diseñado para operar bajo condiciones mesofílicas (temperatura de 15 a 20 °C), ideales para la actividad de bacterias metanogénicas [1,3]. Los parámetros de operación óptimos que se determinaron fueron:

- Temperatura: 17.5 °C
- Tiempo de Retención Hidráulica (TRH): 25 días
- Relación Carbono/Nitrógeno: 25:1
- Porcentaje de sólidos totales en la carga diluida: 7%
- pH: 6.9
- Densidad del estiércol fresco: 994 kg/m³

Se encontró que cada bovino produce cerca de 10 kg de estiércol/día, con un rendimiento estimado de 0.48 m³ de biogás/día por animal [1]. Una parte de este volumen corresponde a metano, cuya eficiencia energética es la que se aprovecha. Además del biogás, el proceso produce un efluente estabilizado llamado biol, que puede usarse como fertilizante orgánico.

2.3. Diseño y evaluación del sistema de climatización

Para garantizar condiciones de confort térmico en el estabulado cerrado, se plantea un sistema combinado de ventilación forzada y aspersión de agua [7]. Con esto se busca controlar la acumulación de calor interno, a través de dos mecanismos complementarios:

Ventilación forzada:

Se calcula el volumen de aire necesario a renovar por hora con base en el volumen del estabulado y un número recomendado de renovaciones. Esto permite extraer el aire





caliente y mantener la calidad del aire interior. A partir de ello se determina: el caudal de aire total requerido, el número de ventiladores necesarios y la potencia eléctrica total del sistema.[5]

Sistema de aspersión:

Se dimensiona un sistema de enfriamiento evaporativo por aspersión de agua, que ayuda a reducir la temperatura interna del estabulado mediante la evaporación del agua en el aire. Para ello se calcula: el caudal total de agua a aplicar por hora, la potencia requerida para bombear dicha agua a través del sistema, considerando altura y eficiencia de bombeo.

3. DESARROLLO

3.1. Análisis térmico del estabulado

a) Calor generado por el ganado:

$$\dot{Q}_g = N \times q_u \quad (3)$$

Donde: N es el número de animales y q_u es el calor sensible por animal.[4]

b) Calor generado por el personal:

$$\dot{Q}_p = N_p \times q_p \quad (4)$$

Donde: N_p es el número de personas y q_p es el calor generado por persona.

c) Calor generado por la iluminación:

$$\dot{Q}_l = N_f \times P_f \quad (5)$$

Donde: N_f es el número de focos y P_f es la Potencia de cada foco.

d) Calor ganado por radiación solar y transmisión:

$$\dot{Q}_e = A \times G_t \quad (6)$$

Donde: A es el área de muros y techo expuestos y G_t es la ganancia térmica por metro cuadrado [9].

e) Carga térmica total del estabulado a retirar:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_g + \dot{Q}_p + \dot{Q}_l + \dot{Q}_e \quad (7)$$

Para el dimensionamiento del estabulado y su análisis térmico se consideraron los valores mostrados en la tabla 1.

TABLA 1. Parámetros para el dimensionamiento y análisis térmico del estabulado

Parámetro	Valor numérico	Unidades
N = Número de bovinos	400	animales
Au = Área por animal	2.5	m ²
H = Altura del estabulado	3.5	m
q_u = Calor sensible por animal	600	W/animal
N_p = Número de personas	5	personas
q_p = Calor generado por persona	120	W/persona
N_f = Número de lámparas	20	focos
P_f = Potencia eléctrica por lámpara	40	W/foco
A = Área expuesta a radiación solar	1000	m ²
G_t = Ganancia térmica por radiación	35	W/m ²

3.2. Diseño del sistema de climatización

Para la climatización del estabulado se emplean dos sistemas: la ventilación forzada y la aspersión, estos son diseñados para actuar de forma complementaria y eficaz en la reducción de la temperatura interna del estabulado.

El sistema de ventilación forzada consiste en el uso de ventiladores mecánicos de gran caudal que aceleran la disipación de calor, aumentando el flujo del aire dentro del estabulado mejoran la convección térmica sobre el cuerpo de los animales. Por otro lado, el sistema de aspersión funciona mediante la instalación de boquillas o aspersores colocados estratégicamente sobre el área donde se encuentran los animales, el agua rociada se evapora rápidamente, extrayendo calor latente de la piel del bovino, generando así un efecto de enfriamiento evaporativo.

Temperatura de confort dentro del estabulado

La temperatura final al interior del estabulado después de eliminar la carga térmica mediante el sistema de climatización de determina a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{m}_{aire} C_{p_{aire}} \Delta T \quad (8)$$

$$T_f = \frac{\dot{Q}_{total}}{\dot{m}_{aire} C_{p_{aire}}} + T_0 \quad (9)$$

Donde: T_0 es la temperatura inicial dentro del estabulado, $\dot{m}_{aire}$ el flujo masico de aire dentro del estabulado y $C_{p_{aire}}$ el calor específico del aire a presión constante.





Ventilación forzada

El sistema de ventilación busca renovar el aire caliente del interior por aire frío exterior. Este sistema se dimensiona con base en el volumen del estabulado y las renovaciones de aire por hora.

El caudal de aire requerido se calcula como:

$$\dot{V} = V_e \times N_r \quad (10)$$

Donde: V_e es el volumen del estabulado y N_r es el número de renovaciones de aire por hora [7,10].

El número de ventiladores a utilizar de acuerdo con las dimensiones del estabulado es:

$$N = \dot{V} / Q_v \quad (11)$$

Donde: Q_v es el caudal de aire por ventilador.

Y la potencia total del sistema de ventilación forzada se obtiene con la siguiente ecuación:

$$P_{vent} = N \times P_v \quad (12)$$

P_v : Potencia de cada ventilador.

Sistema de aspersión

Para este sistema se calcula el flujo másico de agua a rociar y la energía necesaria para bombearla desde el sitio de almacenamiento.

La siguiente ecuación permite obtener el flujo másico de agua de aspersión:

$$\dot{m}_{agua} = \frac{\dot{Q}_{total}}{\eta_{ev} \times h_{fg}} \quad (13)$$

Donde: η_{ev} es la eficiencia de evaporización del agua rociada (70% - 90%) y h_{fg} es la entalpía de evaporización.

Por consiguiente, la potencia hidráulica requerida para bombear el agua se obtiene con la siguiente ecuación:

$$P_h = \dot{m}_{agua} g H_T \quad (15)$$

Donde: $\dot{m}_{agua}$ es el flujo másico de agua a rociar, H_T es la carga total requerida y g la aceleración de la gravedad.

La carga total requerida se obtiene como:

$$H_T = H_{est} + H_{Presión} + H_f + H_{otras} + \Delta H_{vel} \quad (16)$$

Donde: H_{est} es la altura geométrica del sistema de aspersión, $H_{Presión}$ es la presión en los aspersores, H_f son las pérdidas por fricción de la tubería, H_{otras} son pérdidas menores en relación con codos, válvulas, entradas, salidas, entre otros y ΔH_{vel} es la diferencia de carga cinética que en este caso se cuenta con alguna variación en el diámetro de la tubería.

Para calcular la carga de presión en los aspersores se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_{Presión} = \frac{p}{\rho g} N_b \quad (17)$$

Donde: p es la presión de operación de las boquillas, ρ es la densidad del agua, N_b es el número de boquillas en el estabulado y g la aceleración de la gravedad.

Para las pérdidas por fricción de la tubería se usa la ecuación:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (18)$$

Donde: f es el factor de fricción de Darcy, L longitud de la tubería, D diámetro de la tubería, v es la velocidad del flujo.

Para el cálculo de las pérdidas menores se utilizó la siguiente ecuación:

$$H_{otras} = K \frac{v^2}{2g} \quad (19)$$

Donde: K es el coeficiente de pérdida menor que depende de la geometría y tipo de accesorio, v es la velocidad media del fluido y g es la gravedad.

Finalmente, la potencia eléctrica requerida para bombear el agua se obtiene como:

$$P_b = \frac{P_h}{\eta_{bomba} \eta_{motor}} \quad (20)$$





Donde: η_{bomba} es la eficiencia mecánica de la bomba y η_{motor} es la eficiencia eléctrica del motor.

Para el diseño del sistema de climatización se tomaron en cuenta los datos proporcionados en la tabla 2.

TABLA 2. Parámetros para el diseño y evaluación del sistema de climatización

Parámetro	Valor numérico	Unidades
N_r = Renovación de aire	20	Renovación/h
Q_v = Caudal por ventilador	10,000	m ³ /h
P_v = Potencia por ventilador	0.75	kW
$H_{estatica}$ = Altura de los aspersores	3	M
g = Aceleración de la gravedad.	9.81	m/s ²
η_{bomba} = Eficiencia de la bomba	0.7	Adimensional
η_{motor} = eficiencia del motor	0.85	Adimensional
ρ = Densidad del agua	1000	Kg/m ³
$\dot{m}_{aire}$ = Flujo masico del aire	84,000	kg/h
$C_{p,aire}$ = Calor específico del aire	1.005	kJ/kg*k
T_0 = Temperatura inicial del aire en el estabulado	35	°C
η_{ev} = Eficiencia de evaporización	0.7	adimensional
h_{fg} = entalpia de evaporización	2417.9	kJ/kg
f = factor de fricción de Darcy	0.03228	adimensional
L = longitud	126.49	M
D = diámetro de la tubería	0.0254	M
v = velocidad del flujo	0.3222	m/s
p = presión de la boquilla	200	KPa
N_b = número de boquillas	60	boquillas

3.3. Análisis energético de la biomasa

Para obtener la energía producida de la biomasa se estima la cantidad de biogás generado a partir del estiércol producido por los animales.

La producción diaria de estiércol (kg/día), está dada por la siguiente ecuación:

$$E = N \times e \quad (21)$$

Donde: N es el número de animales y e es el estiércol generado por animal (kg/animal/día).

El volumen diario de biogás producido (m³/día), mediante la digestión anaerobia del estiércol, es:

$$V_{biog} = E \times R_b \quad (22)$$

Donde: R_b es el rendimiento de biogás por cada 10 kg de estiércol, está estimado en 0.48 m³/día para estiércol bovino fresco.[1]

Y la energía térmica total del biogás, energía calorífica antes de su conversión, resulta:

$$E_{biog} = V_{biog} \times PCI \quad (23)$$

Donde: PCI es el poder calorífico inferior del biogás, usualmente entre 5.0 y 6.5 kWh/m³. [1,2]

Por último, se calcula la energía eléctrica disponible después de la conversión. Mediante la siguiente ecuación:

$$E_{elec} = E_{biog} \times \eta \quad (24)$$

Donde: η es la eficiencia del generador eléctrico.

A continuación, en la Tabla 3, se muestran los parámetros que se tomaron en cuenta para el análisis energético de la biomasa.

TABLA 3. Parámetros para el análisis energético de la biomasa

Parámetro	Valor numérico	Unidades
e = Cantidad de estiércol producido	10	Kg/animal/día
R_b = Volumen de biogás por animal	0.48	m ³ /animal/día
PCI = Poder calorífico inferior promedio del biogás	5.5	kWh/m ³
η = Eficiencia del generador eléctrico a partir del biogás [2]	0.35	Adimensional

3.4. Evaluación energética

Se obtiene el consumo energético total del sistema de climatización:

$$E_{total} = (P_{vent} + P_b) \times t \quad (25)$$

Donde: t es el tiempo aproximado de operación para el sistema de climatización.



Se compara con la energía disponible del biogás para obtener un balance energético entre la energía disponible de la biomasa y la energía que necesita el sistema de climatización:

$$Balance = E_{elec} - E_{total} \quad (26)$$

4. RESULTADOS

4.1. Dimensionamiento y análisis térmico del estabulado

En la tabla 4, se muestran los resultados del dimensionamiento y el análisis térmico del estabulado. Donde se aprecia que el sistema de climatización debe abatir una carga térmica de 276 KW para alcanzar una temperatura de aproximadamente 23° C, la cual esta dentro del intervalo definido para el confort animal.

TABLA 4. Resultados del dimensionamiento, el análisis térmico del estabulado y las condiciones de confort animal

Parámetro	Valor	Unidades
S= Superficie total del estabulado	1000	m ²
$\dot{Q}_g$ = Calor generado por el ganado	240	KW
$\dot{Q}_p$ = Calor generado por el personal	600	W
$\dot{Q}_l$ =Calor generado por la iluminación	800	W
$\dot{Q}_e$ =Calor por radiación solar	35	KW
$\dot{Q}_{total}$ = Carga térmica total	276.4	KW
T _f = Temperatura final del estabulado	23.23	° C

4.2. Diseño del sistema de climatización

Ventilación forzada

En la tabla 5, se muestran los resultados para el diseño del sistema de ventilación forzada. Donde se aprecia que el sistema de climatización consume 5.25 kW de potencia eléctrica a lo largo de 10 horas de operación de los ventiladores.

TABLA 5. Resultados para el sistema de ventilación forzada

Parámetro	Valor numérico	Unidades
V: Caudal de aire requerido	70,000	m ³ /h
N: Número de ventiladores	7	Ventiladores
P _{vent} : Potencia total del sistema de ventilación forzada	5.25	kW

Sistema de aspersión

El sistema de aspersión consume 3.3 KW de potencia eléctrica, a lo largo del día. Los resultados para el diseño del sistema de aspersión se muestran en la tabla 6.

TABLA 6. Resultados para el sistema de aspersión

Parámetro	Valor numérico	Unidades
$\dot{m}_{agua}$ = Flujo másico de agua	0.1633	kg/s
P _h = Potencia hidráulica	1971.27	W
P _b =Potencia eléctrica	3.313	kW

4.3. Análisis energético de la biomasa

En la Tabla 7, se muestran los resultados correspondientes al análisis energético de la biomasa, donde se observa que la energía eléctrica disponible es de 369.6 kWh/día. Esta cantidad de energía generada es superior al consumo energético total del sistema, lo cual implica que no es necesario utilizar todo el estiércol de bovino para la producción de biogás.

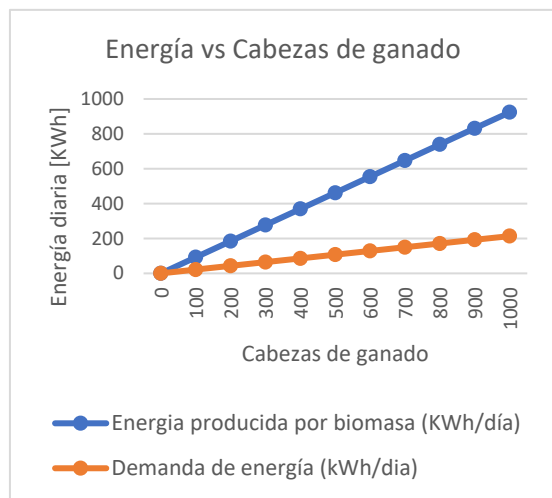
TABLA 7. Resultados del análisis energético de la biomasa.

Parámetro	Valor numérico	Unidades
E= Producción diaria del estiércol	4000	Kg/día
V _{biog} =Volumen diario de biogás	192	m ³ /día
E _{biog} =Energía térmica total del biogás	1056	kWh/día
t= Tiempo de operación	10	h/día
E _{elec} = Energía eléctrica disponible	369.6	kWh/día
E _{total} = Consumo energético total del sistema.	85.63	kWh/día

4.5. Balance energético del sistema

El balance energético muestra que la cantidad máxima de biogás que puede producirse excede casi cuatro veces la demanda energética total del sistema de climatización, por lo que aun considerando pérdidas en el proceso el sistema resulta factible desde el punto de vista energético. En la Grafica 1, se observa la producción de electricidad a partir del biogás, así como el consumo de esta por parte del sistema de climatización, en función de la cantidad de cabezas de ganado bovino.





GRAFICA 1. Balance energético, relación de producción vs consumo

5. CONCLUSIONES

El uso de biomasa en estabulados aporta beneficios ambientales al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, controlar olores, y reutilizar el subproducto del biodigestor como fertilizante orgánico. Además, fortalece la economía del productor al disminuir su dependencia de fuentes de energía convencionales y aprovechar recursos que ya se generan dentro del mismo sistema.

Con base en el análisis energético realizado se observa que para un sistema de climatización combinado; ventilación forzada más aspersión, para un estabulado hipotético de 400 bovinos en San Luis Potosí, el uso de biogás obtenido de los animales resulta energéticamente viable. Además de que dota al sistema de autonomía en la obtención de la energía eléctrica. En el escenario evaluado, el superávit de energía eléctrica útil disponible nos permite cubrir la operación de ventiladores y bombeo de aspersión durante las horas críticas, al igual que tener holguras operativas en caso de picos de carga, variaciones estacionales.

Los resultados confirman que la aspersión intermitente, enfriamiento evaporativo superficial, sinergiza con la ventilación mecánica al incrementar la convección y la tasa de evaporación sobre el lomo del animal, lo que se traduce en descensos efectivos del Índice Temperatura y en el mantenimiento de temperaturas internas dentro o cercanas al rango de confort. Esto se alinea con la fisiología del bovino y

con la climatología semiárida local, donde la humedad relativa moderada favorece la evaporación.

Desde la perspectiva de la biomasa, la producción de biogás supera con creces la demanda eléctrica del sistema de climatización, sin embargo, es importante recalcar que dicha producción depende estrictamente de la cantidad de biorreactores a utilizar, de tal manera que al requerir sólo una tercera parte de la producción de biogás entonces el número de biodigestores sería menor.

En conjunto, el sistema propuesto cierra el ciclo energético del estabulado: la biomasa generada por la operación pecuaria habilita un enfriamiento activo que protege el bienestar animal y la productividad, al tiempo que reduce la dependencia de fuentes externas y mejora la sostenibilidad técnico-económica de la explotación.

6. REFERENCIAS

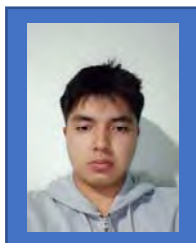
Artículos

- [1]. Delgadillo López AE, Hernández Contreras H, Rojas Ávila A, Morales Cruz LA, Islas Hernández DA, Hernández Díaz Á. Diseño de digestores anaerobios tubulares semicontinuos para producción mesofílica de biogás a partir de residuos pecuarios. Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo; 2023.
- [2]. Rajeshwari KV, Balakrishnan M, Kansal A, Lata K, Kishore VVN. *State of the art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2000;4:135-156.
- [3]. Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring BK. *A comprehensive model of anaerobic bioconversion of complex substrates to biogas*. Biotechnology and Bioengineering. 1999;63(3):363-372.
- [4]. National Research Council (NRC). *A guide to environmental research on animals*. Washington DC: National Academies Press; 1971. ISBN 978-0-309-02039-6.
- [5]. CIGR. *Climatic conditions and ventilation in livestock buildings*. Commission Internationale du Génie Rural. 2002. ISBN 92-990062-2-5.





- [6]. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). *Normales climatológicas 1991-2020 San Luis Potosí*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), México.
- [7]. Brouk MJ, Smith JF, Harner JP. *Evaluating and selecting cooling systems for dairy cows*. Proceedings of the 7th Western Dairy Management Conference, Reno, NV, 2005.
- [8]. Smith JF, Harner JP, Brouk MJ. *Sprinkler and fan cooling system for dairy cows in hot climates*. Kansas State University Extension Bulletin MF-2460.
- [9]. ASHRAE. *HVAC Applications Handbook: Agricultural Facilities*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 2019. ISBN 978-1-939200-79-0.
- [10]. FAO. *Manual of environmental control for animal housing*. FAO Agricultural Services Bulletin 82, 1989. ISBN 92-5-102882-0.



AGUILAR HERNANDEZ VICENTE ARMANDO. Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Tecnologías del Frío de la Escuela Superior de Apan perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Este trabajo fue desarrollado como parte del proyecto “Diseño de Sistemas de Refrigeración y Climatización Sustentable” del Cuerpo Académico de Ingeniería en Tecnología del Frío, con la dirección del Dr. Julio Valle Hernández.



Construcción de un banco de pruebas para la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos

ROCÍO SOLAR-GONZÁLEZ^{a*}, J JESUS ARELLANO-PIMENTE^b, ALEJANDRA VELASCO-PÉREZ^c, JOSÉ VIAN,^d

^a Ingeniería Química, Universidad del Istmo, Ciudad Universitaria S/N Ba. Santa Cruz Tagolaba, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, C.P. 70760, México;

^b Ingeniería en Computación, Universidad del Istmo, Ciudad Universitaria S/N Ba. Santa Cruz Tagolaba, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, C.P. 70760, México;

^c Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Región Orizaba-Córdoba, Orizaba, Veracruz, C.P. 94340, México.

^d Universidad Politécnica de Huatusco, Unidad Chocamán, Chocamán, Veracruz, C.P. 94160, México

Autor de Correspondencia: R. Solar-González (e-mail: solgr@sandunga.unistmo.edu.mx)

RESUMEN La creciente generación de residuos orgánicos y la necesidad de alternativas energéticas sostenibles han impulsado el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa. En este trabajo se presenta el diseño, construcción y validación de un banco de pruebas para la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos. El sistema está compuesto por un contenedor hermético que actúa como biodigestor, sensores para el monitoreo de variables clave tales como presión, pH y concentración de metano, así como un módulo de control de temperatura. Para el calentamiento del sustrato se incorporó dentro del biodigestor un serpentín de acero inoxidable que permite mantener la temperatura óptima del proceso en condiciones mesofílicas (35–40 °C). El monitoreo continuo se realizó mediante la conexión de los sensores a un microcontrolador Arduino UNO, lo que permitió registrar datos en tiempo real y ajustar las condiciones de operación. Los ensayos demostraron que los residuos sólidos orgánicos son una fuente viable para la generación de biogás bajo condiciones estables. Asimismo, se evidenció la importancia de mantener las variables de presión, pH y temperatura dentro de rangos específicos para garantizar la actividad de los microorganismos metalogénicos, así como sus respectivas condiciones de seguridad.

PALABRAS CLAVE: Biodigestor, Automatización, Residuos orgánicos, Biogás.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente generación de residuos sólidos orgánicos (RSO) y la urgente necesidad de fuentes de energía sostenibles han impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas a su valorización energética. Los RSO, constituidos principalmente por restos de alimentos, residuos vegetales y otros desechos biodegradables, representan una fracción considerable de los residuos urbanos generados cotidianamente. Su acumulación en vertederos, sin un tratamiento adecuado, no solo provoca emisiones de gases como dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), que contribuyen significativamente al calentamiento global [1], sino que también genera lixiviados que contaminan suelos y cuerpos de agua, afectando la salud pública y el ambiente [2].

En este contexto, la digestión anaerobia se perfila como una alternativa eficaz para el tratamiento de RSO, al permitir su transformación en biogás, una fuente de energía renovable. Este proceso no solo reduce el volumen de residuos, sino que también contribuye a la mitigación de gases de efecto invernadero [3]. Además, responde a los compromisos asumidos por México en el marco del Acuerdo de París, orientados a la disminución de emisiones de gas de efecto invernadero, como parte de la lucha contra el cambio climático. No obstante, proyecciones recientes sugieren que incluso cumpliendo con dichas metas, el incremento de la temperatura global podría alcanzar entre 3 y 4 °C en las próximas décadas [4], lo que hace imperativa una transición





energética basada en el uso de biocombustibles sostenibles [5].

La producción de biogás mediante digestión anaerobia involucra un proceso microbiológico complejo, desarrollado en cuatro etapas secuenciales llevadas a cabo por consorcios específicos de microorganismos [4]. La primera etapa, hidrólisis, transforma los polímeros orgánicos complejos — como carbohidratos, proteínas y lípidos — en compuestos más simples, facilitando su posterior degradación. Le sigue la acidogénesis, donde bacterias fermentativas producen ácidos grasos volátiles, alcoholes, CO_2 , H_2 y amoníaco. Posteriormente, en la etapa de acetogénesis, estos productos son convertidos en ácido acético, CO_2 e H_2 , siendo esencial el equilibrio de este último para la estabilidad del proceso. Finalmente, la metanogénesis convierte los intermediarios en metano y CO_2 , siendo una etapa particularmente sensible a factores como temperatura, pH e inhibidores químicos.

Los equipos empleados para la generación de biogás mediante DA se les denomina biodigestores, los cuales consisten en sistemas cerrados diseñados para la degradación controlada de materia orgánica. Entre las variantes existentes de estos equipos se encuentran los biodigestores tipo batch o discontinuos, destacando por su simplicidad, bajo costo y facilidad de operación, ya que operan con una única carga de materia orgánica sin alimentación continua, lo que los hace adecuados para contextos rurales, educativos o de baja escala [6]. Además, su implementación contribuye al aprovechamiento energético de residuos en comunidades con infraestructura limitada, fomentando prácticas de manejo sostenible.

Actualmente, el diseño y operación de biodigestores ha evolucionado hacia la incorporación de sistemas de automatización que optimizan el control de variables críticas como temperatura, pH, presión y producción de biogás. La instrumentación adecuada no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también permite su monitoreo en tiempo real, lo que resulta fundamental para garantizar condiciones óptimas de operación y maximizar la producción energética [7]. Para ello, se emplean sensores accesibles de bajo costo, integrados a microcontroladores que facilitan la adquisición y almacenamiento de datos. Estas innovaciones fortalecen el vínculo entre la economía circular y la sostenibilidad ambiental, al convertir residuos en recursos energéticos [8].

En este marco, resulta prioritario fomentar la formación universitaria y la investigación aplicada en energías renovables. La utilización de prototipos funcionales en

entornos académicos representa una herramienta pedagógica valiosa, ya que permite a los estudiantes vincular los contenidos teóricos con experiencias prácticas. En este sentido, el presente trabajo propone el diseño, construcción e instrumentación de un biodigestor anaerobio tipo batch, capaz de monitorear en tiempo real las variables clave del proceso mediante dispositivos económicos. Este prototipo busca contribuir a la enseñanza de tecnologías limpias y al fortalecimiento de capacidades en torno a la gestión sostenible de residuos y la generación de energías renovables.

2. METODOLOGÍA

El seguimiento, control y registro continuo de las variables clave durante el proceso de DA, es esencial para garantizar un ambiente propicio para la actividad microbiana, lo cual se traduce en una conversión eficiente de la materia orgánica en biogás. La implementación de sistemas de instrumentación adecuados permite una supervisión precisa del comportamiento del biodigestor, facilitando la toma de decisiones operativas oportunas. Según [9], el monitoreo constante de parámetros como temperatura, pH, presión y composición del gas es fundamental para mantener condiciones estables y prevenir inhibiciones que comprometan el rendimiento del sistema. En este contexto, el presente trabajo adoptó un enfoque experimental centrado en el diseño, construcción y puesta en marcha de un banco de pruebas a escala piloto, con el objetivo de evaluar el comportamiento del proceso de digestión anaerobia utilizando residuos sólidos orgánicos (RSO) como materia prima. Se priorizó el uso de materiales e instrumentación de bajo costo y fácil adquisición, con el fin de proponer una alternativa técnica accesible y reproducible en contextos de recursos limitados.

El biodigestor fue construido a partir de un recipiente hermético de plástico con una capacidad de 50 L, equipado con una tapa reforzada y un cinturón metálico que garantiza un cierre hermético durante el proceso. En la parte inferior del recipiente se instaló una tubería conectada a una válvula de esfera que permite evacuar el digestato generado así como el vaciado del tanque, facilitando la gestión del residuo final. En la tapa del biodigestor se montaron diversos sensores para el monitoreo en tiempo real del sistema: un sensor de temperatura de termopar tipo K con módulo MAX6675, un sensor piezoresistivo de presión modelo MPX5050, un sensor de pH 4502C y un sensor MQ-4 para la detección de metano. Además, se integró una válvula de seguridad para la liberación del gas acumulado y un motor eléctrico acoplado a un eje que





funciona como agitador, cuyo objetivo es garantizar una mezcla homogénea del sustrato, promoviendo el contacto efectivo entre los residuos orgánicos y las bacterias metanogénicas, lo cual resulta crucial para mejorar la eficiencia del proceso [10].

Para asegurar la estabilidad térmica del sistema, se implementó un serpentín de acero inoxidable instalado en el interior del recipiente, el cual fue alimentado por una corriente de agua caliente proveniente de un baño termostático. Esta estrategia permitió mantener el rango de temperatura adecuado para el desarrollo del proceso. Adicionalmente, el biodigestor fue montado sobre una estructura de madera con ruedas, lo cual facilita su traslado y posicionamiento dentro del espacio de trabajo, optimizando así su operación y mantenimiento.

Uno de los parámetros críticos en la DA es la temperatura, dado que influye directamente en la actividad microbiana y en la velocidad de conversión de los sustratos orgánicos en metano. El proceso puede desarrollarse en tres rangos térmicos: psicofílico (10–20 °C), mesofílico (20–45 °C) y termofílico (50–65 °C). El régimen mesofílico fue seleccionado para este estudio debido a su mayor estabilidad operacional, menor requerimiento energético y adecuación a sistemas de bajo volumen y bajo costo [11]. Para su monitoreo, se utilizó un termopar tipo K acoplado a un módulo MAX6675, el cual presenta ventajas como alta precisión, respuesta rápida y compatibilidad con plataformas de microcontroladores.

El pH es otro de los factores determinantes en la eficiencia del proceso, ya que las bacterias involucradas en la producción de metano son altamente sensibles a su variación. En este estudio se consideró un rango óptimo de operación entre 6.5 y 7.5, especialmente relevante para las bacterias metanogénicas, cuya actividad puede disminuir considerablemente si el pH cae por debajo de estos valores [12]. Para la medición de este parámetro se utilizó el sensor de pH modelo 4502C, que incorpora un potenciómetro y un módulo controlador integrado, lo que permite una calibración sencilla, una buena estabilidad térmica y alta repetitividad de las mediciones.

La presión interna suele emplearse como variable indicadora de la producción acumulada de biogás. En biodigestores rígidos de operación discontinua, la acumulación de gas genera un aumento progresivo de la presión, lo cual permite estimar indirectamente el volumen de biogás producido durante el proceso [13]. Para este caso, se integró un sensor de presión diferencial modelo MPX5050, fabricado en silicio con

tecnología piezoresistiva, que ofrece alta sensibilidad y estabilidad en la salida de voltaje proporcional a la presión registrada. Para este trabajo se consideró que además de que el sensor permite identificar la presencia de gas, funciona como un elemento de seguridad para el tanque biodigestor.

Asimismo, la composición del biogás fue monitoreada utilizando un sensor de gases MQ-4, el cual permite detectar metano en concentraciones expresadas en partes por millón (ppm). El uso de este sensor de bajo costo fue empleado dada su eficiencia energética, tamaño compacto y compatibilidad con sistemas embebidos. La calidad del biogás es un aspecto clave para prevenir la presencia de gases no deseados como CO₂, H₂S, N₂ o vapor de agua, los cuales pueden reducir su poder calorífico y dañar los equipos de aprovechamiento [14].

Para la integración de todos los sensores y el control del sistema, se utilizó un microcontrolador Arduino UNO, programado mediante su entorno de desarrollo (IDE). Esta plataforma abierta y de bajo costo ofrece múltiples ventajas, como la automatización básica de parámetros críticos, la activación de sistemas de control mediante código personalizado, y la posibilidad de escalar o adaptar el sistema de acuerdo con las necesidades del proyecto. La programación desarrollada incluyó la adquisición de datos a intervalos regulares de un minuto para temperatura, pH, presión y concentración de metano, además del control del agitador mediante un ciclo periódico de operación de 10 minutos cada dos horas a una velocidad constante de 20 rpm. Esta estrategia busca asegurar una mezcla adecuada del sustrato, mantener la homogeneidad térmica y reducir zonas muertas dentro del reactor, lo cual mejora la eficiencia general del proceso. La Figura 1 muestra los diferentes sensores considerados para su implementación en el diseño del biodigestor, así como el sistema térmico considerado para la regulación de la temperatura del agua para el serpentín.

En conjunto, esta metodología permite establecer una plataforma experimental confiable y de bajo costo, capaz de monitorear y regular en tiempo real los parámetros más relevantes del proceso de digestión anaerobia, con la posibilidad de generar información útil para su replicación, escalamiento y posterior integración en sistemas de gestión de residuos orgánicos dentro de ambientes tanto académicos como de investigación.





FIGURA 1. Sensores y controladores empleados en el diseño del biodigestor.

3. RESULTADOS

Para la operación del biodigestor se preparó un volumen de 40 L de sustrato con una relación sustrato-agua de 1:3 (v/v), al cual se añadieron 150 g de levadura y 200 g de azúcar para favorecer la actividad microbiana. Los residuos sólidos orgánicos empleados para las pruebas consistieron en restos de frutas y verduras recolectados en un mercado municipal, los cuales fueron clasificados y homogenizados previamente. Para su caracterización, los residuos se sometieron a un pretratamiento que consistió en cortar los materiales en trozos pequeños y triturarlos en licuadora hasta obtener una mezcla homogénea (ver Figura 2).



FIGURA 2. Carga de residuos sólidos orgánicos en el biodigestor.

El recipiente utilizado como biodigestor fue un cilindro de polietileno de alta densidad de grado alimenticio, con una altura de 53 cm (sin tapa), diámetro interno de 32.7 cm y

capacidad de 50 L. En la parte inferior se instaló una tubería con válvula de bola de ½" que permitió la evacuación del digestato al finalizar el proceso. La tapa del recipiente contó con una válvula de bola de ½" para la salida del biogás. Para el sistema de agitación, se realizó un orificio en el centro de la tapa, en el cual se montó un motor eléctrico encargado de mover un eje plástico equipado con dos hélices de 40 cm de longitud y 10 cm de diámetro. El agitador operó a bajas revoluciones para preservar las condiciones anaerobias dentro del biodigestor, realizándose ciclos de agitación de 10 minutos cada 2 horas.

Con el fin de mantener la integridad estructural del recipiente y facilitar el acceso a los sensores, se distribuyeron cuatro orificios en la tapa para alojar los sensores de temperatura, pH, presión y metano. Para evitar fugas, cada sensor fue asegurado con niples y conectores de PVC, sellados con pegamento industrial o silicón para garantizar la hermeticidad. Los sensores calibrados se conectaron a una placa Arduino UNO para el monitoreo continuo de las variables. La Figura 3, muestra conexión individual de los diferentes componentes que conforman el biodigestor. Para la conexión de los diferentes sensores se emplearon otros elementos tales como un protoboard, un relé de cuatro canales, cables dupont y un cargador externo para el motor del agitador así como para la bomba de recirculación de agua al serpiente.

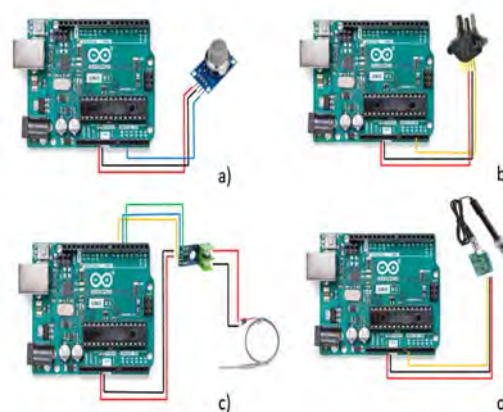


FIGURA 3. (a) Sensor de gas, (b) sensor de presión, (c) sensor de temperatura, (d) sensor de pH.

La Figura 4, muestran la distribución real de los sensores en la parte superior del biodigestor y su conexión a la placa, de igual manera para la visualización de los datos estos se desplegaron en pantalla del monitor serial de Arduino.



FIGURA 4. Biodigestor ensamblado.

Para el control térmico, se instaló un serpentín de acero inoxidable en el interior del biodigestor, cuyos extremos atravesaron la pared del recipiente y se conectaron mediante mangueras plásticas a un sistema de recirculación de agua caliente, impulsada por una bomba con un caudal de 1.2 L/min. La calefacción del agua se gestionó mediante un controlador PID REX-C100, que regula automáticamente la potencia suministrada a una resistencia eléctrica para mantener la temperatura deseada. La Figura 5, ilustra las conexiones entre el controlador y el termopar utilizado para la retroalimentación térmica.

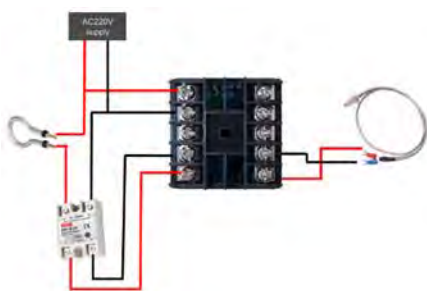


FIGURA 5. Sistema térmico.

Se estableció un periodo de prueba con el objetivo de evaluar el comportamiento del biodigestor y realizar un monitoreo continuo de las variables críticas del proceso. En las condiciones iniciales se registraron los siguientes valores: temperatura de 34 °C, pH de 7.5, presión manométrica de

12 kPa y una producción inicial de gas de aproximadamente 100 ppm. Además, se aplicó agitación mecánica a 20 rpm durante intervalos de 10 minutos. El sistema de control de temperatura se configuró con un valor de consigna de 40 °C para el interior del digestor, a fin de favorecer un entorno mesofílico óptimo para la actividad microbiana.

Tras cinco días de operación, los resultados obtenidos mostraron una mayor estabilidad térmica atribuible al trabajo dentro del rango mesofílico, lo cual favorece la resistencia de las bacterias a cambios abruptos de temperatura. Las mediciones internas del digestor oscilaron regularmente entre 38 °C y 42 °C. Por su parte, el agua recirculada a través del serpentín mantuvo una temperatura controlada de 50 °C, con fluctuaciones mínimas de ± 1 °C, según los registros del sistema PID.

En cuanto al comportamiento del pH, este se mantuvo dentro del intervalo de 8.0 a 9.0. Esta tendencia puede atribuirse a la acumulación de compuestos nitrogenados derivados del sustrato empleado, constituido principalmente por frutas y verduras. Aunque de origen vegetal, estos residuos pueden liberar cantidades apreciables de amoníaco durante la descomposición, elevando el pH del sistema. Por lo tanto, en este tipo de digestores resulta relevante monitorear adicionalmente la concentración de amonio y la relación carbono/nitrógeno, para garantizar la estabilidad del proceso.

Respecto a la producción de metano, se observaron concentraciones cercanas a los 1500 ppm, valor coherente con las condiciones típicas de las etapas iniciales de la digestión anaerobia, en las cuales la población de microorganismos metanogénicos aún se encuentra en fase de adaptación al medio y al sustrato. La carga orgánica basada en frutas y verduras puede favorecer una acumulación transitoria de ácidos grasos volátiles, lo que genera un entorno parcialmente inhibitorio para la metanogénesis. Adicionalmente, factores como un pH ligeramente alcalino y temperaturas aún en estabilización pueden limitar temporalmente la producción de metano. En biodigestores de pequeña escala, especialmente durante el arranque, concentraciones por debajo de 3000 ppm son habituales, por lo que una lectura de 1500 ppm se considera aceptable. Cabe señalar que, al emplear sensores de bajo costo como el MQ-4, es importante considerar los márgenes de error inherentes a estos dispositivos al momento de interpretar los datos de concentración de gas.

Durante la etapa inicial de funcionamiento del biodigestor, se registró una presión interna de aproximadamente 6 kPa, valor que resulta consistente con lo esperado en sistemas de pequeña capacidad y en fases tempranas de la digestión anaerobia. Esta presión indica una producción moderada de biogás, reflejando la fase de adaptación de la microbiota metanogénica al sustrato compuesto por frutas y verduras. En este periodo inicial, la generación de metano aún no alcanza niveles máximos, lo que limita la acumulación de gas dentro del sistema. Factores como el mantenimiento de una temperatura mesofílica estable, la agitación adecuada y el diseño cerrado del biodigestor contribuyen a un incremento gradual y controlado de la presión. Así, la presión registrada de 6 kPa señala un desarrollo adecuado del proceso biológico y asegura condiciones seguras para la operación del equipo. En la Figura 6, se muestra el registro de las lecturas continuas realizadas por los sensores desde la aplicación de Arduino y mediante una pantalla LCD acoplada al sistema.



FIGURA 6. Visualización de datos.

4. CONCLUSIONES

El estudio realizado evidenció que la integración de sistemas de monitoreo y control en un biodigestor de 50 litros, mediante sensores para variables clave como temperatura, pH, presión y metano, facilita un seguimiento continuo y detallado del proceso anaerobio. Durante el tiempo de evaluación, se observó que mantener la temperatura dentro del rango mesofílico contribuye a la estabilidad del proceso y a la actividad de las bacterias metalogénicas, mientras que el control preciso de la temperatura del agua de recirculación aseguró condiciones adecuadas para el desarrollo microbiano. La medición de pH, en un rango ligeramente alcalino, se relacionó con la presencia de compuestos nitrogenados provenientes del sustrato, lo que sugiere la necesidad de vigilar otros parámetros como la concentración de amonio y la

relación carbono/nitrógeno para preservar la estabilidad del sistema. Por otra parte, las concentraciones de metano detectadas en los primeros días indicaron una fase de adaptación de los microorganismos, donde la producción de biogás se encuentra en crecimiento. Finalmente, la presión registrada, cercana a 6 kPa, se consideró acorde con el diseño y la operación segura del equipo, reflejando una acumulación gradual de biogás. En conjunto, los resultados apoyan la factibilidad del sistema implementado para el control eficiente y la optimización de biodigestores de pequeña escala, con potencial para su uso en ámbitos educativos y comunitarios.

REFERENCIAS

- [1]. Mishra, A, Kumar M, Bolan NS, Kapley A, Kumar R., Singh LJBT. *Multidimensional approaches of biogas production and up-gradation: opportunities and challenges*. Bioresour. Technol. 338, 125514 (2021).
- [2]. Chew KR, Leong HY, Khoo KS, Vo DVN, Anjum H, Chang CK, Show PL. *Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: a review*. Environ. Chem. Lett. 19 (4): 2921–2939 (2021).
- [3]. Mancini G, Lombardi L, Luciano A, Bolzonella D, Viotti P, Fino D. *A reduction in global impacts through a waste-wastewater-energy nexus: a life cycle assessment*. Energy 289, 130020 (2024).
- [4]. Velarde-Meza JC, Tiznado-Osuna LJ, Aguilera-Hernández YM, Santos-Ballardo DU. *Producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas*. Identidad Energética. 6(1): 31-37 (2023).
- [5]. Castañeda, D. *México y la historia de sus transiciones energéticas*, Nexos, 18 de marzo de 2021. [Artículo en línea].
- [6]. Issahaku M, Derkyi NSA, Kemausuor F. *A systematic review of the design considerations for the operation and maintenance of small-scale biogas digesters*. Heliyon, 10(1): e24019 (2024).
- [7]. Olvera-López C, Silva-Téllez N, Pérez-Cadena R, Hernández-Escalante M., Medina-Moreno S. A., & Jiménez-González A. *Diseño, construcción e instrumentación de un biodigestor anaerobio tipo batch*. Revista de Ingeniería y Tecnologías para el Desarrollo Sustentable, 12, 154–161 (2024).
- [8]. Vides-Herrera CA, Pardo-García A, Ospino castro AJ. *Automatización de un digestor anaerobio con Sistema embebido para la producción de biogas a partir de*



- residuo del aceite de palma*. Revista Colombiana de Tecnología Avanzada, 2(44): 65-73 (2024).
- [9]. Zhang X, Jiao P, Zhang M, Wu P, Zhang Y, Wang Y, Xu, Kaiyan Yu, Jiazhou Ma L. *Impacts of organic loading rate and hydraulic retention time on organics degradation, interspecies interactions and functional traits in thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge*. Bioresour. Technol. 370 (2023).
- [10]. Instituto Multidisciplinario de Energía, Universidad Nacional de Cuyo. (s.f.). Manual de uso de biodigestores [PDF]. Programa de Biogás. Recuperado de <https://imd.uncuyo.edu.ar/upload/manual-uso-biodigestor.pdf>
- [11]. Nie E, He P, Zhang H, Hao L, Shao L, Lü F. *How does temperature regulate anaerobic digestion?* Renew. Sustain. Energy Rev. 150 (2021).
- [12]. Pramanik SK, Suja FB, Zain SM, Pramanik BK. *The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: prospects and constraints*. Bioresour. Technol. Rep. 8, 100310 (2019).
- [13]. López C, Martínez F, Paredes O. *Automatización de un procesos de digestion anaeróbica*. Revista Cubana de Ciencias Informáticas, 10: 1-16 (2016).
- [14]. Furst L, Feliciano M, Frare L, Igrejas G. *A portable device for methane measurement using a low cost semiconductor sensor: development , calibration and enivromental applications*. Sensor, 21 (22): 7456 (2021).





Evaluación experimental de la velocidad de aire en el interior de un colector solar de doble paso

VICENCIO V. ALMARAZ A.¹, JUAN RODRÍGUEZ R.¹, SANDRA B. VÁSQUEZ G.² LILIA M. LAGUNAS¹ ANDREA M. RIVERA^{1, 3} ALFREDO O. LÓPEZ³

¹Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Oaxaca, 71233, México

²Universidad Tecnológica de los Valles Centrales de Oaxaca, Departamento de Energía y Desarrollo Sustentable, Oaxaca, 71265, México

³Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Química, Oaxaca, 68030, México

Autor de Correspondencia: Vicencio V. Almaraz Almaraz (e-mail: almarazvicencio@gmail.com.mx)

RESUMEN Este estudio evalúa la eficiencia térmica y el comportamiento del flujo de aire en un colector solar de doble paso. En este tipo de colector, el aire circula por dos cámaras, lo que mejora el intercambio térmico al exponerse a la cara inferior y luego a la cara superior de la placa absorbadora. Durante la evaluación térmica, se monitorearon variables ambientales (irradiación solar, velocidad de aire, temperatura ambiente y humedad relativa). Se instalaron termopares para medir temperaturas en distintos puntos del colector, y dos sondas para medir la velocidad del aire en ambas cámaras, estos sensores fueron cambiando de posición a lo largo del colector. Los sensores fueron conectados a un sistema de adquisición de datos DAQ970A. Las mediciones se realizaron en condiciones de cielo despejado. La velocidad del aire a la salida del colector fue estable, con un promedio de 3.76 m/s. En la cámara inferior, se registraron velocidades de 3 m/s en la entrada, 1.5 m/s en la parte intermedia y 3 m/s en la salida hacia la cámara superior. En esta última, la velocidad fue de 1.2 m/s en la parte media y 1.5 m/s en la parte alta cercano a la salida. El calor útil promedio fue de 779 W, y la eficiencia térmica del colector osciló entre 53.3 % y 62.12 %, considerando el fluido como aire húmedo. El colector solar de doble paso alcanza temperaturas superiores a 50 °C, lo que lo hace adecuado para aplicaciones térmicas como el secado de productos agrícolas o procesos industriales que requieren aire caliente.

PALABRAS CLAVE: Colector solar, velocidad de aire, Eficiencia

1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar como fuente de energía puede disminuir los costos energéticos de algunos procesos industriales, así como reducir de impactos ambientales. Un colector solar es un tipo especial de intercambiador de energía que absorbe la radiación solar entrante, lo convierte en calor y se lo transfiere a un fluido calo transportador [1].

Un colector solar de placa plana o Flat Plate Collector (FPC) transforma la energía solar en energía térmica empleando un panel compuesto por una cubierta de cristal, que permite el paso de la radiación solar hasta incidir sobre la superficie selectiva de una placa absorbente, esta última se encuentra aislado por abajo, para evitar pérdidas [2]. Después un fluido calo transportador pasa entre la cubierta de vidrio y la placa absorbadora arrastrando el calor generado.

Un colector solar de doble paso (CSDP) es una modificación del FPC en la cual la superficie absorbente no está en contacto con la estructura aislada, ya que el fluido calo transportador pasa primeramente debajo del absorbador de manera ascendente y luego pasa por orificios de comunicación entre la cámara inferior y la cámara superior, para finalmente hacer el recorrido normal de un FPC.

Los colectores solares comunes (FPC) tienen desafíos y limitaciones que los CSPDP deben abordar, como lo son los requisitos de espacio, la mejora del rendimiento térmico y eléctrico, esto es posible mejorando el diseño de las superficies, los materiales de construcción, la rugosidad de las superficies, y superficies corrugados [3].

Hay algunas cosas que se deben tener en cuenta al realizar un experimento al aire libre o en interiores para



garantizar que pueda producir la mayor eficiencia térmica, que son:

- Disponibilidad de la radiación solar
- Caudales masicos
- Ubicación geográfica
- Días y estaciones
- Angulo de inclinación del colector
- Limpieza

2. METODOLOGÍA

El colector solar evaluado (CSPDP) tiene una longitud de 1.64 m, un ancho de 0.99 m y un grosor de 0.08 m, por lo que cada cámara tiene un grosor de 0.04 m. El colector se une en uno de los lados con un par de bisagras, esto con el fin de que sea abatible. El CSPDP, cuenta con 14 perforaciones de 1" que funcionan como entradas de aire en la parte alta atrás de la cámara de inferior, y una perforación de 4" que sale directo de la cámara de superior atravesando con un ducto la cámara de inferior donde se ubica el ventilador extractor de aire caliente.

Las mediciones se realizaron en días totalmente soleados, para evitar la interferencia de nubes en la medición de la irradiancia solar. Las mediciones se realizaron en un horario de 10:00 a las 15:00. El lugar de la instalación y medición está en plano terrestre con latitud 17.02714 y longitud -96.72036, en las instalaciones de CIIDIR IPN, Unidad Oaxaca.

2.1. Instrumentación

La evaluación del colector solar implica la medición de variables ambientales como la velocidad de aire la temperatura, la irradiancia solar, y otros parámetros relacionados con la transferencia de calor en un colector solar.

Para la medición de las variables se emplean sensores, transductores y un sistema de adquisición de datos, así como procesador de datos y texto para el análisis térmico del CSPDP.

Para la medición de temperaturas en el CSPDP se emplean termopares tipo K. Se midió la temperatura de la cubierta de vidrio y de la placa absorbidora. La distribución de los termopares se puede observar en la Figura 1.



FIGURA 1. Distribución de termopares en el CSPDP; 1, 2 cara exterior e interior de cubierta de vidrio; 3, 4, 5, 6, 7 Y 8 temperaturas en la superficie frontal del absorbedor, y 9 temperatura en la cara posterior del absorbedor.

Se utilizaron dos piranómetros Kipp & Zonen *CMP3* para la medición de la irradiancia solar (W/m^2), estos se colocaron en una zona libre de sombras y de superficies reflejantes. La temperatura ambiente y la humedad relativa se midieron con un equipo *Autonics THD*, esta temperatura se toma con la temperatura de entrada del colector, ya que la alimentación de aire para el colector se toma del ambiente. La medición a la salida del colector se realizó con un anemómetro *Kanomax TAT 420*, que mide velocidad de aire y temperatura.

La velocidad del aire en las dos cámaras del colector se midió utilizando dos sondas *Kanomax 0975-10* conectados a un transductor *Kanomax 6333*, con un rango de medición de 0.01 m/s a 50 m/s. Las dos sondas se colocaron en distintos puntos estratégicos del colector, con el objetivo de registrar la variación de la velocidad del aire en ambas cámaras durante su recorrido. En una primera medición la primera sonda se introdujo en el punto A y la segunda en el lado opuesto A'. Después de un periodo de 25 minutos, ambas sondas se reubicaron de forma simultánea al siguiente par de puntos B y B', y así sucesivamente hasta cubrir los puntos de interés. La Figura 2 muestra los puntos específicos donde se introdujeron las sondas para llevar a cabo las mediciones.

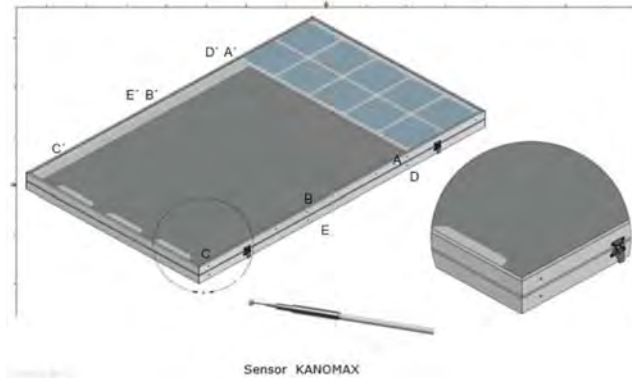


FIGURA 2. Ubicación de las sondas Kanomax 0975-10, El par de puntos A-A' y B-B' se encuentran en la cámara superior y los pares E-E' y D-D' se encuentran en la cámara inferior, y el par C-C' se encuentra en la conexión de ambas cámaras, en ese punto el aire que ya circula por la primera sube a la cámara posterior.

Los transductores y los termopares tipo K se conectaron a un sistema de adquisición de dato DAQ970A, que registro los datos cada 5 segundos, desde las 10:00 hasta las 15:00 horas.

2.2. Estimación de la razón de concentración de la mezcla aire vapor de agua

Dado que el colector solar calienta aire del ambiente, no es un aire seco, tiene un pequeño porcentaje de vapor de agua, por lo cual en este estudio se tomaron propiedades termodinámicas de una mezcla aire-vapor de agua.

La psicrometría considera al aire atmosférico como una mezcla de aire seco y vapor de agua, por lo cual las propiedades termodinámicas se han de calcular a partir de esta afirmación. Todo el cálculo parte teniendo como premisa a la humedad relativa, para el cual la asociación internacional de las propiedades del agua y del vapor (International Association for the Properties of Water and Steam IAPWS), ofrece una fórmula para la presión de saturación del vapor de agua con suficiente precisión para una temperatura que va desde 0 °C hasta los 373 °C [4]

$$P_{ws} = A \times 10^{\frac{m \times T}{T + T_n}} \quad (1)$$

Donde A, m y son parámetros ajustables dados por IAPWS, los valores a ocupar en este caso se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 1. Parámetros ajustables

Sustancia	A	m	Tn	Rango de temperatura
Agua	6.089613	7.33502	230.3921	0... 200 °C

Posterior al cálculo de la presión de saturación del agua, se calcula la presión de vapor a partir de la humedad que presenta el ambiente en el día que se toma la medición

$$P_w = P_{ws} \frac{HR}{100} \quad [hPa] \quad (2)$$

A partir de estos datos y la presión de ambiente se procede a calcular la razón de mezcla, que es una medición que muestra la razón de la masa de vapor de agua sobre la masa del gas seco, que en este caso es el aire seco.

$$x = \frac{B \times P_w}{P_{tot} + P_w} \quad g/kg \quad (3)$$

El valor de B depende del gas, en este caso B=621.9907 es válido para el valor del aire.

$$B = \frac{M(H_2O)}{M(gas) \times 100} \quad g/kg \quad (4)$$

Donde M(H₂O) es el peso molecular del agua y M(gas) es el peso molecular del gas.

Las propiedades de transporte están relacionadas con el transporte de masa, energía y cantidad de movimiento

2.3. Cálculo de la viscosidad de la mezcla

Los métodos para estimar la viscosidad de mezclas de gases a baja presión son básicamente interpolativos, esto es, requieren conocer las viscosidades de sus componentes puros. El método de Wilke para la determinación de la viscosidad de la mezcla a bajas presiones requiere del conocimiento previo de las fracciones molares de cada uno de los componentes presentes en la mezcla, y de las viscosidades de estos mismos a la misma temperatura [5]

El modelo matemático que determina la viscosidad de una mezcla de gases a baja presiones es dado por la ecuación 5, esta ecuación está generalizada para mezclas multicomponentes.



$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \quad (5)$$

El parámetro de interacción ϕ_{ij} está dado por la ecuación 6.

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2 \quad (6)$$

Y el parámetro ϕ_{ji} está dada por la ecuación 7.

$$\phi_{ji} = \frac{\mu_j M_i}{\mu_i M_j} \phi_{ij} \quad (7)$$

Para una mezcla binaria las ecuaciones anteriores se expresan de la siguiente manera

$$\mu_m = \frac{y_1 \mu_1}{y_1 + y_2 \phi_{12}} + \frac{y_2 \mu_2}{y_2 + y_1 \phi_{21}} \quad (8)$$

Y los parámetros de interacción se obtienen de la siguiente manera

$$\phi_{12} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_2}{M_1} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

$$\phi_{21} = \frac{\mu_2 M_1}{\mu_1 M_2} \phi_{12} \quad (10)$$

Cálculo de conductividad térmica, densidad y calor específico de una mezcla

La ecuación de Wassiljewa está basada en la teoría cinética de los gases ideales, relaciona la fracción molar de los componentes con la conductividad térmica puro de cada componente, la determinación de la conductividad térmica de la mezcla es dada por la ecuación 11.

$$K_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i k_i}{\sum_{i=1}^n y_i \phi_{ij}} \quad (11)$$

Cuando se tiene una mezcla de sustancias, la densidad de una sustancia se puede estimar a partir de la fracción

másica de los componentes y las densidades de los componentes puros.

$$\rho = \sum_{i=0}^n y_i \rho_i \quad (12)$$

Donde ρ_i es la densidad del i-ésimo componente y y_i la fracción molar del i-ésimo componente.

Para una mezcla de composición conocida el calor específico se puede estimar mediante la ecuación 13, donde C_{pi} es el calor específico del i-ésimo componente.

$$C_{pm} = \sum_{i=0}^n y_i C_{pi} \quad (13)$$

3. RESULTADOS

3.1. Temperatura de salida del colector e irradiancia solar

Las pruebas se realizaron en días totalmente soleados para evitar la interferencia de las nubes, por lo cual en la gráfica de la Figura 3, se observa que la irradiancia solar aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor máximo promedio cercano a los 900 W/m², y posteriormente comienza a decrecer.

A medida que aumenta la irradiancia, también lo hacen las temperaturas de entrada y salida del colector, indicando que el sistema responde adecuadamente a la energía solar incidente. La diferencia de la temperatura de salida con respecto a la de la entrada se mantiene constante y en algunos lapsos incrementa levemente, lo que sugiere una eficiencia estable del colector bajo condiciones de mayor radiación.

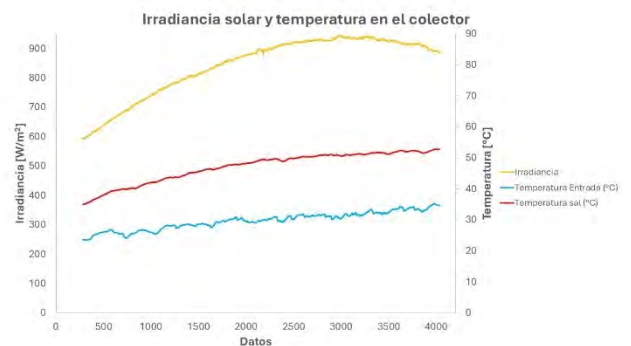


FIGURA 3. Gráfica de la temperatura de entrada y salida en el colector y la irradiancia solar



3.2. Comportamiento de la velocidad del aire en el interior del CSPDP

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la velocidad de aire en el interior de ambas cámaras del CSPDP.

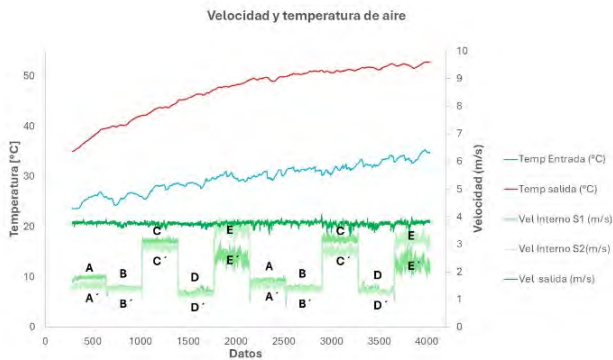


FIGURA 4. Gráfica de la temperatura de entrada y salida en el colector y las velocidades del aire en el interior de ambas cámaras

En los puntos E-E', que es el punto ubicado cercano a la entrada del aire en el CSPDP, existe una variación de la velocidad, ya que el aire tiene múltiples entradas, la densidad y la baja temperatura provocan una fluctuación, presentando un promedio de 3 m/s, aunque la sonda 1 con respecto a la sonda 2 tienen una variación promedio de 1 m/s. Solo en ese par de punto se presenta esa variación.

Los puntos D-D' presentan una baja de velocidad, con un promedio de 1.5 m/s, en ese punto el aire tiene un ligero aumento de ganancia térmica.

El paso de aire de la cámara inferior a la cámara superior, el punto C-C' presenta una velocidad promedio de 3 m/s, es decir que incrementa dos veces con respecto al punto D, esto puede deberse a que existe una menor área transversal por donde cruza el aire para llegar a la cámara superior.

El aire al cruzar el punto B-B' presenta una caída, con un promedio de 1.2 m/s, debido que ya ha sido calentado presentando una menor densidad.

Finalmente, en el punto A-A' la velocidad del aire vuelve a subir levemente, esto debido al efecto de la succión por parte del ventilador. La cámara superior presenta un flujo

más estable que la cámara inferior, aunque esta influenciado por el ventilador.

El punto final de comparación de todos los puntos medidos es la velocidad de salida del colector solar que presenta un promedio de 3.76 m/s. Es la más alta posible ya que se encuentra sujeta de manera directa al ventilador, también presenta estabilidad a lo largo de la medición. En el interior del CSPDP existen zonas de alta y baja velocidad indicando que la distribución puede no ser uniforme.

3.2. Humedad, calor útil y Eficiencia

La humedad relativa registrada durante la medición varió a lo largo del día, iniciando en un 29 % y disminuyendo progresivamente hasta alcanzar un 23 %, lo que se puede observar en la Figura 5. A partir de estos valores se determinó la fracción del vapor de agua y de aire seco en la mezcla, con el fin de calcular sus propiedades termo-físicas. Como resultado se obtuvo una densidad promedio de 1.05 kg/m³, un calor específico de 1.00714 kJ/kg·K y una viscosidad dinámica de 2.06669*10⁻⁵ kg/m·s.

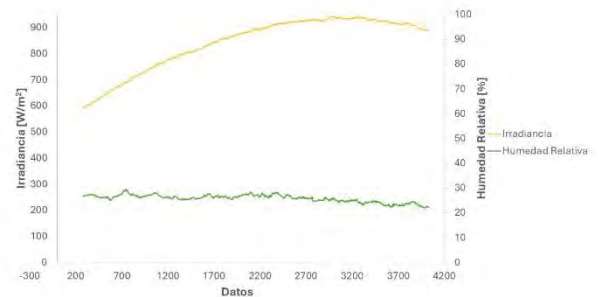


FIGURA 5. Gráfica del comportamiento de la humedad relativa con respecto a la irradiancia

A partir de las propiedades termo-físicas determinadas, se calculó el calor útil del sistema, que cuantifica la energía térmica efectivamente aprovechada. El colector solar presentó una conversión de 779.79 W de la energía solar incidente en energía térmica. Este valor permitió estimar la eficiencia térmica, que se encontró en un rango de 53.3 % a 62.12 %. El área de apertura del colector es de 1.625 m², de la cual 0.375 está ocupada por un módulo fotovoltaico destinado a la alimentación eléctrica del



ventilador. En consecuencia, el sistema integra la conversión simultánea de energía solar en energía térmica y energía eléctrica, maximizando el aprovechamiento del recurso solar.

4. CONCLUSIONES

El análisis experimental del colector solar de doble paso evidenció un comportamiento térmico y aerodinámico coherente con el principio de funcionamiento.

La temperatura del aire mostró un incremento sostenido desde la entrada hasta la salida, en respuesta directa a la variación de la irradiancia solar, confirmando la efectividad del intercambio térmico.

Las mediciones de velocidad de aire indicaron un patrón de variación desde la cámara inferior a la cámara superior, con una zona crítica entre la transición de ambas cámaras, debido al incremento de presión.

El diseño híbrido permitió la generación simultánea de energía eléctrica y energía térmica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CIIDIR IPN, Unidad Oaxaca; por prestar su infraestructura y sus instalaciones para el desarrollo de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Solar Energy Engineering Processes and Systems, Oxford: Academic Press, 2014.
- [2] «Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria,» *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, n° 27, pp. 59-73, 2022.
- [3] «Recent development on double pass solar thermal collector,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 183, 2023.
- [4] W. PruB, «The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of,» *Journal of Physical and*, pp. 387-535., 2002.
- [5] B. E. O'connell, «The Properties of Gases and Liquids,» USA: McGraw-Hill., 2001.





Análisis crítico de las normas mexicanas de eficiencia energética en edificaciones

G. HUELSZ^{1*}, M.V. CRUZ-SALAS¹, J. ROJAS¹, J.M. OCHOA², I. MARINCIC²

¹ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México,
Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62580, MÉXICO;

² Depto. de Arquitectura y Diseño, Universidad de Sonora, Bv. Luis Encinas y Rosales s/n, colonia Centro, Hermosillo, Sonora, 83000, MÉXICO.

Autor de Correspondencia: Guadalupe Huelsz (e-mail: ghl@ier.unam.mx).

Este trabajo fue financiado por PAPIIT-UNAM IT101824 y por el Programa de intercambio Académico de la UNAM con la UNISON

RESUMEN La eficiencia energética en las edificaciones es de suma relevancia para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero responsables del cambio climático. Las edificaciones son infraestructuras que en México duran en general más de 50 años, por lo que las acciones que se lleven a cabo para las nuevas edificaciones tendrán efecto durante muchos años. Con el objetivo de aumentar la eficiencia energética en las edificaciones, la Secretaría de Energía estableció dos normas oficiales la NOM-008 y la NOM-020, para edificios no residenciales y residenciales, respectivamente. Ambas normas limitan la ganancia de calor de los edificios a través de su envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento. En este trabajo se realiza un análisis crítico de ambas normas. El principal problema de estas normas es que para calcular la transferencia de calor a través de cada uno de los elementos de la envolvente utilizan solo la resistencia térmica (K) del sistema constructivo con que está hecho cada elemento, esto corresponde a utilizar el modelo de transferencia de calor independiente del tiempo. Se argumenta por qué este modelo es inadecuado para dicho cálculo en los climas de México, se demuestran las significativas diferencias entre los resultados del modelo independiente del tiempo con el modelo dependiente del tiempo, que corresponde a la situación real. Lo anterior justifica que las dos normas deben ser modificadas en su totalidad.

PALABRAS CLAVE: Eficiencia energética, Edificaciones, Transferencia de calor, Envolvente arquitectónica, Normatividad.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el consumo de energía por las edificaciones representa 34% del consumo total de energía y se estima que contribuye con el 37% de las emisiones de bióxido de carbono equivalente a la atmósfera [1]. En nuestro país, se estima que estos corresponden a 18% [2] y 40% [3], respectivamente.

En México las edificaciones tienen una duración de más de 50 años, por lo que las acciones que ahora se lleven a cabo para las nuevas edificaciones tendrán una repercusión de muchos años.

Con el objetivo de incrementar la eficiencia energética en edificaciones, el gobierno mexicano, a través de la Secretaría de Energía, y en particular de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONNUE), desarrolló y promulgó dos normas oficiales: la NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios no residenciales [4] y la NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios para uso habitacional [5]. La envolvente de un edificio está compuesta por todos los elementos que separan el interior del edificio del exterior, es decir está compuesta por el piso que colinda con el suelo, los muros exteriores y el techo del edificio, así como las ventanas y puertas que estén en dichos elementos. Es a través de la envolvente que el aire al interior del edificio intercambia calor con el exterior, de ahí su relevancia para la eficiencia energética de las edificaciones.

En este estudio, se presentan las fortalezas y debilidades de estas normas. Se presentan resultados de estudios anteriores y se obtienen nuevos resultados que justifican por qué estas normas deben ser modificadas en su totalidad.





2. DESCRIPCIÓN DE LAS NORMAS NOM-008 Y NOM-020

La NOM-008 y la NOM-020 tienen como objetivo limitar las ganancias de calor a través de la envolvente en los edificios con el fin de disminuir el consumo de energía de sistemas de aire acondicionado para enfriamiento.

Para que un edificio proyectado cumpla con la NOM correspondiente, la ganancia total de calor a través de la envolvente debe de ser menor o igual a la de un edificio de referencia. El edificio de referencia es el mismo edificio que el proyectado, pero considera que los muros son 90% opacos, con solo 10% de porción transparente (ventanas) y el techo es 100% opaco.

El cálculo de la transferencia de calor para determinar la ganancia total de calor considera la ganancia de calor por conducción a través de los elementos opacos y la ganancia de calor por radiación a través de las porciones transparentes. Para el cálculo de la transferencia de calor a través de los elementos opacos utiliza un método independiente del tiempo, esto quiere decir que considera constantes tanto la temperatura del aire exterior como la del aire interior. Para el edificio de referencia el cálculo de la transferencia de calor por conducción utiliza un coeficiente global de transferencia de calor dado para cada ciudad de México. Para el cálculo de la ganancia de calor por radiación considera la ganancia de calor solar por orientación, un coeficiente de sombreado del vidrio de cada porción transparente y un factor de corrección por sombreado exterior para cada porción transparente. Para el edificio de referencia el coeficiente de sombreado tiene un valor de 1.0 y no se consideran elementos de sombreado exterior.

Para realizar los cálculos referentes a la NOM-020 la CONUEE desarrolló una herramienta basada en una hoja de Excel que se encuentra en <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-calculo-nom-020-ener-2001>

3. ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS NOM-008 Y NOM-020

La principal fortaleza de las NOM-008 y NOM-020 es el que se hayan promulgado y que han servido para poner de manifiesto la necesidad de la eficiencia energética en las edificaciones.

El primer problema que se detecta en estas normas es la contradicción entre el objetivo de la norma y la aplicación en todo el territorio nacional. Como ya se mencionó, el objetivo de las normas es disminuir el consumo de energía por el empleo de sistemas de aire acondicionado para enfriamiento,

pero su aplicación es para todo el país independientemente del clima del lugar [6]. En este sentido, la NOM-020 ya fue modificada, no así la NOM-008. En 2016 [7], se acotó la verificación de la NOM-020 a las ciudades que tengan tarifas eléctricas: 1C, 1D, 1E y 1F, es decir a aquellas ciudades que, por tener climas cálidos con altas temperaturas en la época de calor, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) les otorga tarifas especiales con subsidios significativos, en general de abril a octubre [8].

El segundo problema de estas normas y el más importante es que están basadas en el modelo de transferencia de calor independiente del tiempo que no toma en cuenta el efecto de la masa térmica. El modelo de transferencia de calor independiente del tiempo tiene la gran ventaja de que solo requiere del cálculo de la resistencia térmica (K) de cada elemento de la envolvente para calcular la transferencia total a través de la misma. Sin embargo, la aplicación de este modelo solo es adecuada para la época fría de lugares con temperaturas muy bajas y baja radiación solar en dicha época [9]. En los climas de México, la variación de la temperatura del aire al exterior a lo largo de un día y los altos niveles de radiación solar hacen que el modelo independiente del tiempo sea inadecuado [10]. Se ha demostrado que, para el cálculo de la transferencia de calor en elementos aislados de la envolvente, el error entre el modelo independiente del tiempo y el dependiente del tiempo en el caso de que la edificación cuente con aire acondicionado es de hasta un 74% [6]. Para una casa completa se han evaluado las diferencias entre ambos modelos en las cargas térmicas de enfriamiento y calefacción siendo éstas de hasta 30 % [11].

El tercer problema que se detecta es que se asume que todas las edificaciones cuentan con aire acondicionado. En México, se estima que 48% de edificios residenciales en la zona norte del país cuentan con al menos un equipo de aire acondicionado, sin embargo, para el sureste corresponde solo al 12% [12]. Esto es relevante, ya que se ha demostrado que el comportamiento de un sistema constructivo de muro o techo de la envolvente se comporta de manera diferente cuando el edificio opera con aire acondicionado que cuando no se encuentra con aire acondicionado [13]. Seleccionar un sistema constructivo porque reduce el consumo de energía cuando el edificio cuenta con aire acondicionado, puede resultar que sea desfavorable si el edificio no cuenta con aire acondicionado.

Ligados el segundo y el tercer problema, se ha demostrado que, para el cálculo de la transferencia de calor en elementos aislados de la envolvente, el error entre el modelo independiente del tiempo y el dependiente del tiempo en el caso de que la edificación no tenga aire acondicionado es de hasta un 600% [6]. Para una casa completa se han evaluado las diferencias entre ambos modelos en los promedios





mensuales de las temperaturas máximas diarias y mínimas diarias siendo de hasta 8.3°C y 6.4°C, respectivamente, y las diferencias en los grados hora de discomfort frío y calor son de hasta 124%. [11].

El cuarto problema de las NOM-008 y NOM-020 es que no toman en cuenta el color exterior de techos y muros de la envolvente. El color exterior de un elemento de la envolvente es un indicativo cercano de su absorción solar. La absorción solar es la fracción de la energía solar incidente sobre una superficie que es absorbida por esta, lo que repercute directamente en la energía transferida a través del sistema constructivo del elemento de la envolvente.

El quinto problema es que las normas no toman en cuenta el uso de estrategias bioclimáticas o sistemas pasivos, exceptuando el sombreado de ventanas.

4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

Este estudio tiene por objetivo proporcionar nuevos elementos para justificar la necesidad de una modificación total de las normas NOM-008 y NOM-020. Ya que las dos normas son similares en su metodología y solo difieren en el uso de la edificación, y de los valores de la resistencia térmica (K) de referencia y de las temperaturas equivalentes utilizados para el cálculo de la ganancia térmica del edificio, el estudio se realiza solo para la NOM-020.

4.1. Metodología del estudio de la NOM-020

La metodología comprende la realización de simulaciones térmicas empleando el programa EnergyPlus [14] de una casa tipo en dos ciudades con clima cálido: Hermosillo con clima cálido seco extremo y Mérida con clima cálido húmedo [15], la primera con tarifa 1F (temperatura media mínima en verano de 33°C) y la segunda con tarifa 1D (temperatura media mínima en verano de 31 °C). Se considera que una localidad alcanza la temperatura media mínima en verano mencionada en cada caso, cuando alcance el límite indicado durante tres o más años de los últimos cinco de que se disponga de la información correspondiente. Se considera que durante un año alcanzó los límites de temperatura indicados en cada caso cuando registre la temperatura media mensual durante dos meses consecutivos o más, según los reportes elaborados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [8]. Se consideran cuatro casos de estudio que emplean distintos sistemas constructivos para la envolvente, los cuales se evalúan conforme a la NOM-020. Los cuatro casos de estudio son: Caso base (Base), techo aislado al exterior (Te), techo y muros de la envolvente aislados en la parte exterior (Te/Me)

y techo y muros exteriores aislados en la parte interior (Ti/Mi).

Se realizan dos tipos de simulaciones térmicas: empleando el modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo (D) y empleando el modelo de transferencia de calor independiente del tiempo (I). Las primeras se realizan con el algoritmo de funciones de transferencia y las segundas con el algoritmo *NoMass*.

En las simulaciones térmicas, el comportamiento de los cuatro casos se evalúa durante los meses de abril a octubre para dos condiciones de operación: con aire acondicionado de enfriamiento y sin aire acondicionado.

En la Tabla 1 se resumen las simulaciones realizadas para cada ciudad y se introduce su nomenclatura.

TABLA 1. Simulaciones realizadas

Nomenclatura	Caso	Modelo
Base-D	Base	Dependiente
Te-D	Te	Dependiente
Te/Me-D	T/Me	Dependiente
Ti/Mi-D	T/Mi	Dependiente
Base-I	Base	Independiente
Te-I	Te	Independiente
Te/Me-I	T/Me	Independiente
Ti/Mi-I	T/Mi	Independiente

Por otro lado, se calcula la ganancia de calor de acuerdo a la NOM-020 para los cuatro casos de estudio y para el edificio de referencia en las dos ciudades. Estos resultados se comparan con los resultados de las simulaciones con aire acondicionado.

Adicionalmente, empleando simulaciones térmicas, se evalúa el efecto del color exterior, considerando tres valores de absorción solar de las superficies exteriores de la envolvente (0.2, 0.5 y 0.9), esto se realiza para los casos Base y Te/Me en la ciudad de Hermosillo.

4.2. Descripción de la casa tipo

La casa tipo utilizada para este estudio es la misma casa empleada para el desarrollo de la NOM-020. La casa es de dos pisos con área total construida de 100 m² y está adosada a casas iguales a ambos lados. La fachada principal está orientada al sur. La casa se divide en ocho zonas térmicas (en el primer piso: estancia, cocina y baño; en el segundo: tres recámaras y un baño; y uniendo ambos niveles: la escalera). Se consideran cargas térmicas internas por cuatro personas y por equipamiento. Se considera que las personas ocupan la cocina y la estancia de 09:00 a 10:00 y de 17:00 a 19:00 entre semana, y de 10:00 a 22:00 el fin de semana. La ocupación de las recámaras es de 21:00 a 09:00 del día siguiente entre semana y de 22:00 a 10:00 del día siguiente en el fin de semana. Más detalles de las cargas térmicas por personas y



por equipamiento pueden consultarse en [10, 16]. Para todas las simulaciones, se consideró infiltración de 0.5 cambios de aire por hora. La temperatura del suelo se consideró de acuerdo a lo recomendado en [17]. Para las simulaciones en la condición con aire acondicionado, se consideró que el aire acondicionado solo se enciende cuando los espacios están ocupados por personas.

4.3. Descripción de los casos de estudio

El caso base (Base) tiene muros de la envolvente con acabado cemento-arena al exterior (0.5 cm), tabique rojo (14.0 cm), acabado de yeso al interior (1.5 cm) y el techo con impermeabilizante elastomérico (0.3 cm), mortero cemento-arena (2.5 cm), concreto de alta densidad (10.0 cm) y acabado de yeso al interior (1.5 cm). Los muros interiores son de tabique (14.0 cm) con acabado de yeso a ambos lados (0.5 cm). El piso es de concreto de alta densidad (10.0 cm) y la losa entre pisos es de concreto de alta densidad (12.0 cm) con acabado de yeso en la parte inferior (1.5 cm) [10, 16].

El caso con techo aislado en la parte exterior (Te) es similar al caso base, pero se le agrega entre el mortero y el concreto una capa de aislante hecho de poliuretano espolvoreado (5.0 cm). El caso con techo y muros de la envolvente aislados en la parte exterior (Te/Me) es similar al anterior, agregándole aislante de poliestireno expandido (2.5 cm) en los muros de la envolvente entre el acabado cemento-arena y el tabique.

El caso con techo y muros de la envolvente aislados en la parte interior (Ti/Mi) es similar al anterior, pero el aislante de poliuretano espolvoreado (5.0 cm) en el techo se coloca entre el concreto de alta densidad y el yeso. El aislante de poliestireno expandido (2.5 cm) en los muros de la envolvente se coloca entre el tabique y el acabado de yeso.

5. RESULTADOS

Los resultados se presentan de acuerdo con los pasos señalados en la metodología.

5.1. Diferencia entre los dos modelos para la condición con aire acondicionado

Para la condición con aire acondicionado de enfriamiento se compara el consumo de energía durante los meses de abril a octubre obtenido por ambos modelos, para cada caso de estudio. En las Figuras 1 y 2 se presentan dichos consumos de energía para las ciudades de Hermosillo y Mérida, respectivamente. Los resultados muestran que la diferencia entre usar el modelo dependiente del tiempo y el independiente del tiempo puede llevar a errores de hasta el 20% en consumo de energía por enfriamiento en los meses de abril a octubre.

Ambos modelos predicen que en la condición con aire acondicionado el empleo de aislamiento en la envolvente disminuye el consumo de energía para enfriamiento. Los resultados del modelo independiente del tiempo para los casos Te/Me y Ti/Mi son iguales, esto se debe a que este modelo solo depende de la resistencia térmica de los sistemas constructivos y para sistemas constructivos que tienen las mismas capas, aunque en orden diferente es la resistencia térmica es la misma. En ambas ciudades los resultados del modelo dependiente del tiempo indican que poner el aislante al interior de los sistemas constructivos de la envolvente es más conveniente. Sin embargo, este no es un resultado que se pueda generalizar, puede depender del horario de ocupación de los espacios y por ende del horario de uso del aire acondicionado.

Al comparar los resultados entre las dos ciudades, se nota que el consumo de energía en Hermosillo es mayor, y también es mayor la diferencia porcentual entre los dos modelos.

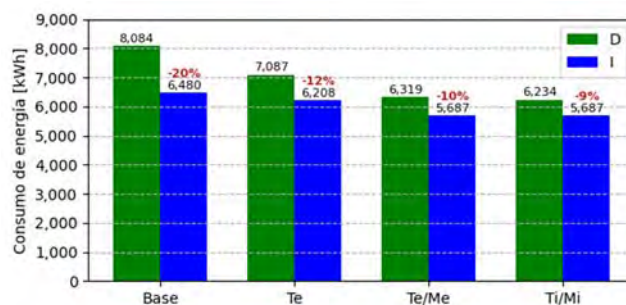


FIGURA 1. Diferencia entre los dos modelos, dependiente del tiempo (D) e independiente del tiempo (I) para la condición con aire acondicionado, para los cuatro casos de estudio en la ciudad de Hermosillo.

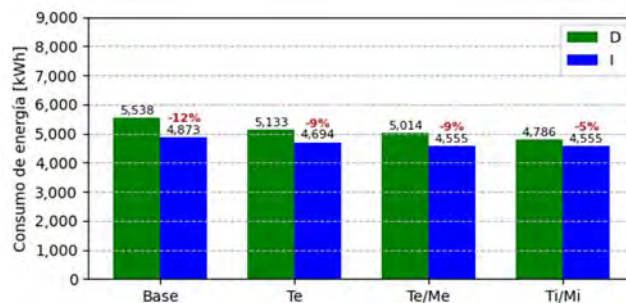


FIGURA 2. Diferencia entre los dos modelos, dependiente del tiempo (D) e independiente del tiempo (I) para la condición con aire acondicionado, para los cuatro casos de estudio en la ciudad de Mérida.

5.2. Diferencia entre los dos modelos para la condición sin aire acondicionado

Para la condición sin aire acondicionado de enfriamiento se comparan los grados hora de discomfort por calor (GHD_c) obtenidos por los dos modelos durante las horas de ocupación de cada zona térmica en los meses de abril a octubre, en las Figuras 3 y 4 se presentan los resultados para las ciudades de Hermosillo y Mérida, respectivamente. En ellas se observa que en ambas ciudades la diferencia entre los dos modelos es mayor para las recámaras que para la estancia y la cocina. El modelo independiente del tiempo sobreestima los GHD_c en la estancia y cocina, con una diferencia máxima de 9% (para la estancia caso base en Mérida) y los subestima en las recámaras con una diferencia máxima de 34% (para las recámaras 2 y 3 caso base en Hermosillo). La diferencia de comportamiento entre los espacios se debe a los horarios de ocupación de los mismos. Como es de esperarse, también los GHD_c son mayores en Hermosillo que en Mérida.

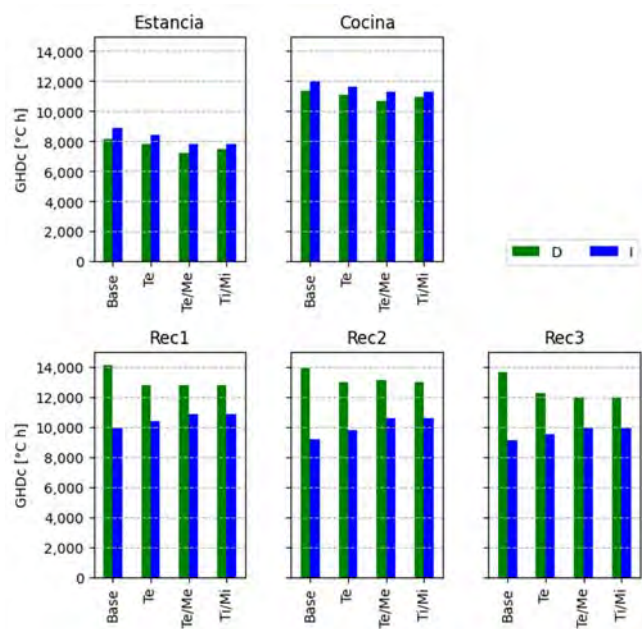


FIGURA 3. Diferencia entre los dos modelos, dependiente del tiempo (D) e independiente del tiempo (I) para la condición sin aire acondicionado, para los cuatro casos de estudio en la ciudad de Hermosillo.

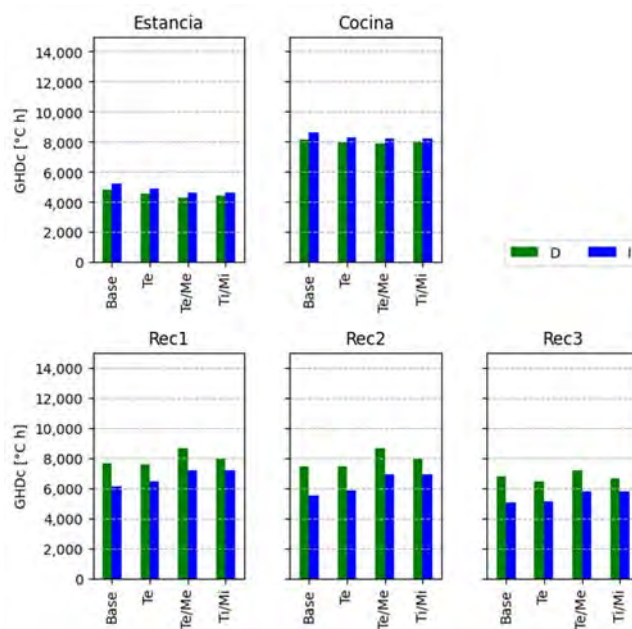


FIGURA 4. Diferencia entre los dos modelos, dependiente del tiempo (D) e independiente del tiempo (I) para la condición sin aire acondicionado, para los cuatro casos de estudio en la ciudad de Mérida.

5.3. Diferencia de resultados de las simulaciones con los de la NOM-020

En la Figura 5 se muestra el resultado de la ganancia de calor total obtenida de la aplicación de la NOM-020 a los casos de estudio, para las dos ciudades, se incluye el edificio de referencia para la norma. Se nota que al igual que lo obtenido por el modelo independiente del tiempo en las simulaciones, los resultados de la norma son independientes del lugar donde se coloque el aislante térmico. La comparación de la ganancia de calor total del edificio de referencia con la de los casos analizados, en cada ciudad, indica que, en ambas ciudades, solo los casos con el techo y muros aislados pasan la NOM-020.

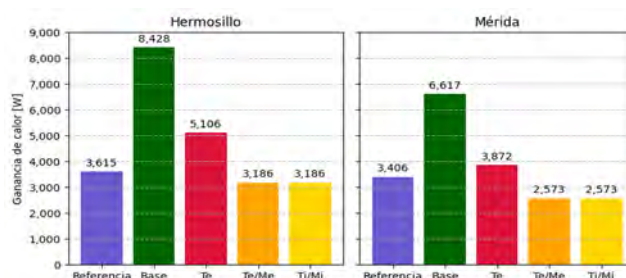


FIGURA 5. Ganancia de calor calculada por la NOM-020 para los cuatro casos de estudio y para el edificio de referencia, en las ciudades de Hermosillo y de Mérida.

Para comparar los resultados de las simulaciones con ambos modelos para la condición con aire acondicionado (Figuras 1 y 2), con los resultados de la NOM-020 (Figura 5), se toma como referencia el caso base. Los resultados del ahorro de energía se muestran en las Tablas 1 y 2, para Hermosillo y Mérida, respectivamente. Se observa que la NOM-020 sobreestima en forma significativa el efecto de la incorporación de aislante térmico. Incorporar aislante en el techo en la parte exterior representa según la NOM-020 un ahorro del 39% de energía para Hermosillo y del 41% para Mérida, mientras que las simulaciones con el modelo dependiente del tiempo indican que el ahorro sería solo del 12% y 7%, respectivamente. Incorporar aislante en el techo y en muros en la parte exterior, representa según la NOM-020, un ahorro del 62% de energía para Hermosillo y del 61% para Mérida, mientras que las simulaciones con el modelo dependiente del tiempo indican que el ahorro sería solo del 22% y 9%, respectivamente en estas ciudades, cuando se incorpora en la parte exterior y del 23% y 14% cuando se incorpora en la parte interior.

TABLA 1. Ahorro de energía respecto al caso base, para los casos obtenidos por las simulaciones dependientes del tiempo (D) y NOM-020 para Hermosillo.

Caso	D [%]	NOM-020 [%]
Edificio de referencia		57
Base	0	0
Te	12	39
Te/Me	22	62
Ti/Mi	23	62

TABLA 2. Ahorro de energía respecto al caso base, para los casos obtenidos por las simulaciones dependientes del tiempo (D) y NOM-020 para Mérida.

Caso	D [%]	NOM-020 [%]
Edificio de referencia		60
Base	0	0
Te	7	41
Te/Me	9	61
Ti/Mi	14	61

5.4. Efecto del color exterior de la envolvente

El efecto del color exterior de la envolvente en el consumo de energía por enfriamiento de abril a octubre, obtenido en las simulaciones dependientes del tiempo, considerando tres valores de absorptancia solar (A) de las superficies exteriores de la envolvente (0.2, 0.5 y 0.9), se presenta en la Figura 6 para los casos base y Te/Me en la ciudad de Hermosillo. Tomando en cuenta como referencia el consumo de energía

correspondiente a A=0.9 (color muy oscuro o negro) se tiene un ahorro de energía para el caso base del 42% en el al usar A=0.2 (color blanco) y del 25% al usar A=0.5 (colores intermedios). Para el caso Te/Me las correspondientes cantidades son del 21% y 12%.

Como se observa, el efecto del color exterior de la envolvente es importante en climas cálidos, sin embargo, las NOM-008 y NOM-020 no toman en cuenta este parámetro.

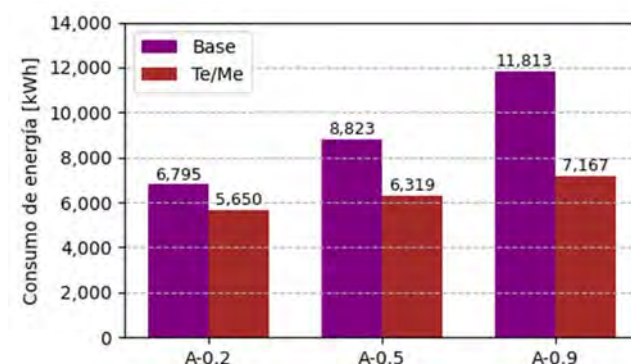


FIGURA 6. Efecto del color exterior de la envolvente, para el caso base en la ciudad de Hermosillo. Se consideran tres valores de absorptancia solar A-0.2, A-0.5 y A-0.9.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El alto consumo de energía por la operación de las edificaciones en México y en particular por el consumo de energía para su enfriamiento debe reducirse a través de la existencia de normas que sean efectivas para dicha reducción. Si bien, utilizar el modelo de transferencia de calor independientemente del tiempo, como lo hacen actualmente las NOM-008 y NOM-020, simplifica los cálculos, no es el adecuado para los climas de México. Los resultados de las simulaciones térmicas realizadas a una vivienda tipo en Hermosillo y en Mérida muestran que usar el modelo independiente del tiempo puede llevar a errores de hasta el 20% en el cálculo del consumo de energía por enfriamiento en los meses de abril a octubre cuando la vivienda cuenta con aire acondicionado, y de hasta 34% en los grados hora de desconfort cálido en las recámaras cuando la vivienda no cuenta con aire acondicionado.

La comparación de resultados entre las simulaciones con el modelo dependiente del tiempo para la vivienda con aire acondicionado (consumo de energía por enfriamiento) y los de la NOM-020 (ganancia de calor total) indican que la NOM-020 sobreestima en forma significativa el efecto de la incorporación de aislante térmico en la envolvente. Por ejemplo, incorporar aislante en el techo y en muros en la



parte exterior representa según la NOM-020 un ahorro del 61% para Mérida, mientras que las simulaciones con el modelo dependiente del tiempo indican que el ahorro sería solo del 9%.

Las NOM-008 y NOM-020 no contemplan el efecto del color exterior de la envolvente. En este estudio se demuestra que para la vivienda tipo, este efecto puede ser significativo. Por ejemplo, para el caso base en Hermosillo, usar un color blanco ($A=0.2$) representa un ahorro de energía del 42% comparado con usar un color muy oscuro o negro ($A=0.9$), esto representa un ahorro mayor que usar aislante en techo y muro en toda la envolvente, el cual representa hasta el 39%, con $A=0.9$.

El análisis general de las normas NOM-008 y NOM-020 presentado, los estudios previos y los nuevos resultados presentados en este artículo, demuestran que las normas NOM-008 y NOM-020 deben ser modificadas en su totalidad.

AGRADECIMIENTOS

M.V. Cruz-Salas (CVU 422473) agradece la beca de posdoctorado de la SECIHTI.

REFERENCIAS

- [1]. UN environment programme. Beyond foundations. UN (2023). ISBN-978-92-807-4131-5.
- [2]. Secretaría de Energía, Balance Nacional de Energía 2023. (2025). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance_Nacional_de_Energ_a_2023.FINAL06.02.2025.1.pdf
- [3]. World Resources Institute, Llamam descarbonizar el sector construcción para enfrentar la crisis climática y fortalecer la economía mexicana. Boletín de prensa (2024). <https://es.wri.org/noticias/llaman-descarbonizar-el-sector-construccion-para-enfrentar-la-crisis-climatica-y>
- [4]. Diario Oficial, NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones. envolvente de edificios no residenciales. Diario Oficial, (2001).
- [5]. Diario Oficial, NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envolvente de edificios para uso habitacional. Diario Oficial, (2011).
- [6]. G. Huelsz, J. Rojas, R. Tovar, G Barrios, Propuestas de mejoras a las normas mexicanas de eficiencia energética en edificaciones, 4º Foro Permanente de Eficiencia Energética en Edificaciones. Taller internacional: La envolvente de la vivienda como elemento clave para la eficiencia energética en viviendas de clima cálido en México, Monterrey 7 y 8 de mayo de 2014. Organizado por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/84290/propmejnormficTallerMontVf3.pdf>
- [7]. Diario Oficial, RESOLUCIÓN por la que se modifican los valores de coeficiente global de transferencia de calor (K) de la Tabla 1, se agregan definiciones y se acota la verificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envolvente de edificios para uso habitacional, publicada el 9 de Agosto de 2011. Diario Oficial, (2016).
- [8]. Comisión Federal de Electricidad (CFE), Esquema tarifario vigente Hogar, (2025). <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>
- [9]. Kuehn, T.H., Ramsey J.W., and Threlkeld J.L., Thermal environmental engineering. Prentice Hall, 3 Edition (1998). ISBN-10. 0139172203.
- [10]. Huelsz G., Barrios G., Rechtman R., Rojas J., Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación. En Estudios de Arquitectura Bioclimática, Anuario 2010 Vol. X. Compilador Aníbal Figueroa Castrejón. Editorial Limusa y UAM Azcapotzalco, (2010) ISBN 978-607-477-482-5, pp. 7-19.
- [11]. Huelsz G, Álvarez-Almeida G, Rojas J, Barrios G. 2022. Importance of taking into account the thermal mass in simulations for a non-air-conditioned house. Ingeniería Investigación y Tecnología (México), 03,1-15. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.3.024>
- [12]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI) 2018, (2018) <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>
- [13]. Barrios G, Huelsz G, Rechtman R, Rojas J, Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. Energy and Buildings 43: 219-223 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.015>





- [14]. Department of Energy of US (DOE). EnergyPlus Version 23.1.0 Documentation. Engineering Reference, (2023).
- [15]. Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI). Código de Edificación de Vivienda, CONAVI, pp. 305 (2010).
- [16]. Hernández-Martínez, E. Estudio de la influencia de las ventanas en el funcionamiento térmico de las edificaciones. Cuernavaca, Morelos, México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), (2013).



José Manuel Ochoa de la Torre es un arquitecto mexicano con especialización en Heliodiseño por la UNAM y Fuentes Renovables de Energía por la ENEA. Posee un doctorado en Arquitectura por la Universidad Politécnica de Cataluña y es profesor e investigador titular en la Universidad de Sonora desde el 2000.

Como líder del Laboratorio de Energía, Medio Ambiente y Arquitectura, y director del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables, ha contribuido significativamente a la investigación sobre la relación entre el ambiente, la tecnología y el diseño urbano. Su enfoque interdisciplinario

combina ciencias exactas, naturales y sociales con disciplinas humanísticas para comprender la habitabilidad humana. Además, ha dejado su huella como proyectista, constructor y consultor en proyectos de diseño bioclimático y eficiencia energética en espacios urbanos.

Es consultor en diseño bioclimático y ha participado en diversos proyectos de infraestructura verde y eficiencia energética en las edificaciones. Ha publicado numerosos libros y artículos especializados, y es un conferencista destacado en congresos nacionales e internacionales.



Guadalupe Huelsz es Investigadora Titular, integrante del Grupo de Energía en Edificaciones del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores mexicano. Estudió la licenciatura en Física, maestría y doctorado en Ingeniería Mecánica en la UNAM. Dentro de sus líneas de investigación están los estudios de transferencia de energía y masa en edificaciones, particularmente la transferencia de calor a través de sistemas constructivos de la envolvente y la ventilación natural. Es

impulsora del diseño bioclimático como elemento fundamental para la eficiencia energética en edificaciones y así contribuir a la sustentabilidad de las mismas.

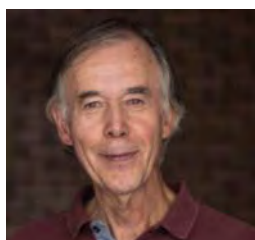


Irene Marincic es Profesora-Investigadora Titular del Dpto. de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Sonora, México. Estudió Ing. Civil en la Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires, Argentina, y el Doctorado en Ing. de Caminos, Canales y Puertos en la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España. Su área de especialización es en eficiencia energética en edificios, edificios de bajo consumo de energía, confort térmico, sustentabilidad ambiental, entre otros temas. Perteneció al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (SECIHTI) y al Sistema Nacional de Investigadores de México.



Miriam Verónica Cruz-Salas, mexicana, es posdoctorante SECIHTI en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, en Temixco, Morelos. Es Arquitecta por la Universidad Autónoma de Chiapas (2016, Felicitaciones por Escrito) y obtuvo los grados de Maestra (2014) y Doctora en Ingeniería (2018, Mención Honorífica) en el IER-UNAM. Se especializa en el diseño bioclimático de edificaciones, priorizando el confort térmico de los ocupantes, el ahorro energético y el uso adecuado de la ventilación natural. Su investigación combina experimentos de laboratorio, mediciones en edificios construidos y simulaciones térmicas con

los programas EnergyPlus y OpenStudio.



Jorge Rojas es Investigador Titular, integrante del Grupo de Energía en Edificaciones del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores mexicano. Estudió la licenciatura en el Instituto Tecnológico de Puebla, la maestría en la UNAM y el doctorado en Imperial College, Londres. Realiza investigación básica y experimental en mecánica de fluidos y transferencia de calor.





Modelos de confort térmico adaptativo para edificaciones en México

G. HUELSZ^{1*}, J. LANDA¹, I. OROPEZA-PEREZ²

¹ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, 62580, MÉXICO

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas S/N, 76010, Santiago de Querétaro, MÉXICO

Autor de Correspondencia: G. Huelsz (e-mail: ghl@ier.unam.mx).

Este trabajo fue financiado por PAPIIT-UNAM IT101824.

RESUMEN Lograr el confort térmico de los ocupantes de una edificación con el menor consumo de energía es una de las metas del diseño de una edificación para que esta pueda considerarse sustentable. Cada vez más, en la etapa de diseño de una edificación se realizan simulaciones numéricas del mismo para evaluar su desempeño térmico y energético. En particular para evaluar el confort térmico de los ocupantes debe contarse con un modelo adecuado. En este trabajo se presentan dos modelos de confort térmico adaptativo para edificaciones naturalmente ventiladas y para edificaciones con aire acondicionado que son válidos para todos los climas de México en el rango de la temperatura del aire exterior de 5°C a 45°C para el primero y de 10°C a 45°C para el segundo. Estos modelos se obtuvieron del análisis de datos recabados en una investigación previa reportada en [Oropeza-Perez et al. *Energy and Buildings* 145 (2017) 251–258]. Además, estos modelos se comparan con otros modelos desarrollados para algún clima de México y con modelos desarrollados a nivel internacional comúnmente utilizados en evaluaciones de edificaciones en México.

PALABRAS CLAVE: Confort térmico, Edificaciones, Naturalmente ventilada, Aire acondicionado.

1. INTRODUCCIÓN

Se logra el confort térmico de los ocupantes de una edificación cuando las condiciones térmicas al interior de una edificación, dada la actividad y vestimenta de los ocupantes de la edificación, produce que los ocupantes sientan satisfacción térmica con el ambiente. Aunque esta definición es simple, obtener modelos para predecir las condiciones en las que los ocupantes estarán en confort térmico en una edificación es complejo.

Una edificación será más sustentable si provee confort térmico a sus ocupantes con el menor consumo posible de energía [1]. El consumo de energía en edificaciones (sectores residencial, comercial y público) en México representa el 18% del consumo total de energía, siendo la climatización, y en específico el enfriamiento de las edificaciones, un factor importante dentro de este consumo [2]. Dado que más del 80% de la energía de nuestro país proviene de la quema de combustibles fósiles [2], es imperativo disminuir el consumo de energía en las edificaciones a través de medidas de eficiencia energética, como es la aplicación de estrategias de diseño bioclimático y de la concientización de los usuarios de cómo disminuir el consumo de energía por buenas prácticas de uso.

El diseño bioclimático es el diseño de las edificaciones de acuerdo al clima del lugar donde serán construidas [3]. Para evaluar estrategias de diseño bioclimático en la etapa de diseño, cada vez más se utilizan simulaciones térmicas de toda la edificación empleando programas como EnergyPlus [4].

Por su modo de operación las edificaciones se clasifican en naturalmente ventiladas, con aire acondicionado (entendido como de calentamiento y/o enfriamiento) y mixto. El modo mixto es aquel en que en una edificación se utiliza la ventilación natural cuando esta estrategia puede proveer confort térmico a los ocupantes y se utiliza aire acondicionado, cuando no es posible lograr confort térmico con ventilación natural, generalmente debido a que la temperatura del aire exterior es superior a una temperatura de confort.

De todo lo anterior se concluye la necesidad de contar con modelos que permitan predecir el confort térmico de los ocupantes de una edificación.

En este trabajo se presentan los dos tipos de modelos de confort térmico que existen en la literatura, así como los estudios de confort térmico que se han realizado en nuestro





país y se justifica la necesidad del desarrollo de un nuevo modelo adaptativo para México.

2. MODELOS DE CONFORT TÉRMICO

Los modelos de confort térmico se clasifican en dos tipos, los modelos no adaptativos y los modelos adaptativos. A continuación se describen estos modelos.

2.1. Modelos no adaptativos

Los modelos no adaptativos son aquellos que consideran que dada una misma actividad y vestimenta y mismas condiciones al interior los ocupantes de cualquier edificación sienten el mismo nivel de confort térmico independientemente del clima del lugar y otros factores como su nivel de aclimatación.

El principal modelo no adaptativo, es el Voto Medio Predicho (PMV por sus siglas en inglés, *Predicted Mean Vote*). Este modelo fue desarrollado por Fanger a través de muchas encuestas a personas en cámaras climáticas con condiciones controladas en Estados Unidos y Europa [5]. La principal ventaja de este modelo es que predice la sensación térmica como una función de la actividad, vestimenta y de los parámetros del ambiente: temperatura, humedad, presión y velocidad del aire y temperatura media radiante. Ligado a este modelo está el Porcentaje Previsto de Disatisfechos (PPD por sus siglas en inglés, *Predicted Percentage of Dissatisfied*). De acuerdo con este modelo, no existe ninguna condición en que el 100% de los ocupantes muestren satisfacción con el ambiente, el máximo es 95%. Este modelo ha sido incluido en estándares como el de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) [6] y en herramientas de cálculo como el CBE Thermal Comfort Tool [7].

2.2. Modelos adaptativos

Los modelos de confort térmico adaptativos toman en cuenta el clima del lugar dado que las personas tienden a aclimatarse. Algunos modelos también consideran que las personas realizan acciones para mejorar su confort térmico, como vestirse adecuadamente y abrir y cerrar ventanas.

Existen dos modelos adaptativos que son modificaciones al modelo PMV. El primero es el PMV extendido (PMVe), desarrollado por Fanger y Toftum para edificaciones sin aire acondicionado en climas cálidos [8]. En este modelo se introduce un factor de expectativa que depende del clima del lugar y del nivel de uso de aire acondicionado en la región. Además, se reduce ligeramente el metabolismo considerando que el cuerpo está habituado al calor. El segundo modelo

basado en el PMV es el PMV adaptativo (aPMV) [9]. Este modelo está desarrollado para edificaciones naturalmente ventiladas. Se basa en correlacionar el voto de sensación térmica de ocupantes de una o varias edificaciones en una región con el valor de $aPMV = PMV / (1 + \lambda PMV)$ donde λ es el coeficiente de adaptación. La desventaja de este modelo para la evaluación del confort térmico de un edificio en etapa de diseño es que se deben realizar encuestas en edificios similares cercanos.

Existen otros modelos adaptativos que solo toman en cuenta la temperatura del aire. Determinan un valor de temperatura de confort al interior (T_c) que depende de la temperatura del aire al exterior (T_o), ya sea del promedio mensual o de la temperatura de días anteriores con un mayor peso a los días más recientes, llamada *running temperature*. Estos modelos se han desarrollado para edificios naturalmente ventilados y para edificios con aire acondicionado y están basados en encuestas a ocupantes de edificaciones existentes.

Humphrey y Nicol [10] desarrollaron este tipo de modelos, uno para edificaciones naturalmente ventiladas, $T_c = 13.5^\circ C + 0.546 T_o$, (1) válido en el rango $5.0^\circ C \leq T_o \leq 32.0^\circ C$ y con una amplitud de la zona de confort de $\pm 1.8^\circ C$.

Y otro modelo para edificaciones con aire acondicionado, $T_c = 22.2^\circ C + 0.003 T_o^2$, (2) válido en el rango $0.0^\circ C \leq T_o \leq 35.0^\circ C$.

Auliciems y Szokolay [11] desarrollaron un modelo para edificaciones naturalmente ventiladas, $T_c = 17.8^\circ C + 0.31 T_o$, (3) válido en el rango $11.0^\circ C \leq T_o \leq 32.5^\circ C$. Este modelo ha sido adoptado por el estándar ASHRAE con un rango de validez de $10.0^\circ C \leq T_o \leq 33.5^\circ C$ y con una amplitud de la zona de confort de $\pm 2.5^\circ C$ para un 90% de ocupantes en confort y de $\pm 3.5^\circ C$ para un 80% de ocupantes en confort [6, 7].

3. NORMAS Y ESTUDIOS DE CONFORT TÉRMICO EN MÉXICO

En México no existe ninguna norma que establezca condiciones de confort en edificaciones, sin embargo en la norma oficial sobre condiciones de trabajo [12], se recomienda la temperatura del aire de $22^\circ C \pm 2^\circ C$ para la época fría y de $24.5^\circ C \pm 1.5^\circ C$ para la época cálida.

Existen pocos estudios sobre confort térmico en México. Algunos de ellos han determinado una temperatura de confort para edificios naturalmente ventilados en un clima específico para una época del año: para clima templado en





época fría: 22.6°C [13] y 23.7°C [14]; y en época cálida: 24.8°C [13].

Marincic y colaboradores analizaron el confort térmico de ocupantes de viviendas en la ciudad de Hermosillo, con clima cálido seco extremoso, encontrando una mayor tolerancia al calor en personas no acostumbradas al aire acondicionado [15], determinaron la temperatura de neutralidad para la época cálida de 32.2°C y de 26.9°C para la época fría [16]. Este grupo también desarrolló un modelo adaptativo dependiente de la temperatura y la humedad para la misma ciudad [17].

Otros estudios han desarrollado modelos de confort térmico adaptativo para predecir la temperatura de confort en ciudades de México o climas específicos como función de la temperatura exterior.

López-Pérez y colaboradores desarrollaron dos modelos para edificios educativos en clima cálido húmedo [18], uno para edificaciones naturalmente ventiladas,

$$T_c = 18.45^\circ C + 0.32 T_o, \quad (4)$$

y otro modelo para edificaciones con aire acondicionado,

$$T_c = 22.7^\circ C + 0.13 T_o. \quad (5)$$

Ambos válidos en el rango $22.0^\circ C \leq T_o \leq 26.5^\circ C$.

Cetz y Azpetia también desarrollaron dos modelos para edificios educativos pero en clima cálido subhúmedo [19], uno para edificaciones naturalmente ventiladas,

$$T_c = 6.58^\circ C + 0.792 T_o, \quad (6)$$

válido en el rango $24.5^\circ C \leq T_o \leq 38.0^\circ C$.

Y otro modelo para edificaciones con aire acondicionado,

$$T_c = 27.61^\circ C + 0.026 T_o, \quad (7)$$

válido en el rango $24.5^\circ C \leq T_o \leq 39.0^\circ C$.

El estudio más completo sobre confort térmico en México fue llevado a cabo por Oropeza-Perez y colaboradores [20] quienes desarrollaron modelos de confort térmico adaptativo para predecir la temperatura de confort para edificaciones naturalmente ventiladas y para edificaciones con aire acondicionado en México, en época de calentamiento y de enfriamiento. Dividieron el territorio nacional en cuatro climas de acuerdo con las cuatro regiones señaladas en [21]: clima árido (al norte del país), tropical seco (costas del Pacífico, parte sur de la península de Baja California y parte norte de la península de Yucatán), templado (centro del país) y tropical húmedo (costas del Golfo de México y Caribe).

4. DESARROLLO DE LOS MODELOS ADAPTATIVOS PARA MÉXICO

En este estudio se utiliza la base de datos generada en el estudio [20]. Esta base de datos consiste en más de 6,000 de

pares de datos de la temperatura del aire al exterior en un momento dado y la temperatura que el ocupante deseaba como temperatura de confort. Estos datos están divididos por clima y por condición de edificación naturalmente ventilada y edificación con aire acondicionado, donde además se separan en la época de calentamiento y en la época de enfriamiento.

La razón que llevó a los autores del presente estudio a realizar un análisis de los datos obtenidos en [20] sin tomar en cuenta el clima reportado es que la división climática en que se basó el análisis llevado a cabo en [20] es muy genérica, solo se consideran climas por regiones del país, sin considerar el clima real de cada ciudad. Por lo que se consideró que los datos podrían agruparse solo por tipo de modo de operación de la edificación y con ello generar dos modelos que pueda ser más fáciles de aplicación en todo el país.

Para comprender como se obtuvieron los datos en el estudio previo, se presenta un resumen de la metodología empleada.

4.1. Metodología empleada para la adquisición de los datos

En el estudio [20] participaron 74 estudiantes voluntarios del Departamento de Arquitectura de la Universidad de las Americas Puebla, cuyo hogar familiar se encontraba en México y a cuyo clima ya se encontraban aclimatados. Uno de los requisitos para participar fue que su hogar contara con algún sistema de aire acondicionado para que pudieran tener ambas condiciones: naturalmente ventilado y con aire acondicionado. Se desarrolló un cuestionario que debían contestar durante la estancia en su hogar para vacaciones de invierno (2015) y vacaciones de verano (2016). En el cuestionario se solicitaba escribieran la temperatura del aire exterior y la temperatura que deseaban como temperatura de confort para diferentes momentos durante su estancia.

4.2. Modelo para edificaciones naturalmente ventiladas

En la base de datos se tienen más de 3,000 de pares de datos correspondientes a las edificaciones naturalmente ventiladas.

En la Figura 1 se presentan los datos para las edificaciones naturalmente ventiladas. En esta figura se observa que la mayoría de los datos se encuentran en el intervalo de $10.0^\circ C \leq T_o \leq 30.0^\circ C$ y que la dispersión de valores de T_c es en la mayor parte de los datos de hasta $\pm 3^\circ C$. También se observa que a menores y mayores valores de T_o la variación de T_c es menor y para valores intermedios de T_o la variación de T_c es mayor.



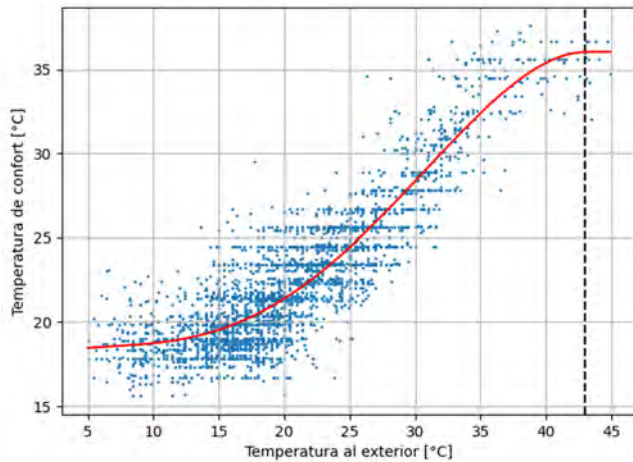


FIGURA 1. Datos y modelo para edificaciones naturalmente ventiladas. En azul los datos de la base de datos de [20] y en rojo es el modelo desarrollado, dado por la ecuación 8. La línea vertical separa el intervalo entre la función polinomial y la función constante.

A los datos se les realizaron ajustes a varias ecuaciones, encontrando que la función que proporciona un mayor valor en el coeficiente de correlación (r) [22] es una función en pedazos: una función polinomial para la mayor parte del intervalo de validez y una función constante para una pequeña parte. Para la función polinomial se utilizó la correlación de Spearman [23], que es más adecuada para funciones polinomiales. El modelo está dado por la siguiente función (nota para la función polinomial, no se ponen las unidades de los coeficientes, pero ambas T_c y T_o están en $^{\circ}\text{C}$),

$$T_c = 17.696 + 0.2841T_o - 0.03690T_o^2 + 0.002170T_o^3 - 0.0000287T_o^4 \quad \text{si } T_o < 43.0^{\circ}\text{C}$$

y

$$T_c = 36.0^{\circ}\text{C} \quad \text{si } T_o \geq 43.0^{\circ}\text{C}. \quad (8)$$

La regresión obtuvo $r = 0.83$. Este modelo es válido en el rango $5.0^{\circ}\text{C} \leq T_o \leq 45.0^{\circ}\text{C}$ y se muestra en la Figura 1.

4.3. Modelo para edificaciones con aire acondicionado

En la base de datos se tienen más de 3,000 de pares de datos correspondientes a las edificaciones con aire acondicionado.

En la Figura 2 se presentan los datos para las edificaciones con aire acondicionado. En esta figura se observa que la mayoría de los datos se encuentran en el intervalo de $20.0^{\circ}\text{C} \leq T_o \leq 35.0^{\circ}\text{C}$ y que la dispersión de valores de T_c es mayor que para el caso de edificaciones naturalmente ventiladas, en la mayor parte de los datos de hasta $\pm 5^{\circ}\text{C}$. No

se observa la relación que para el caso de edificaciones naturalmente ventiladas.

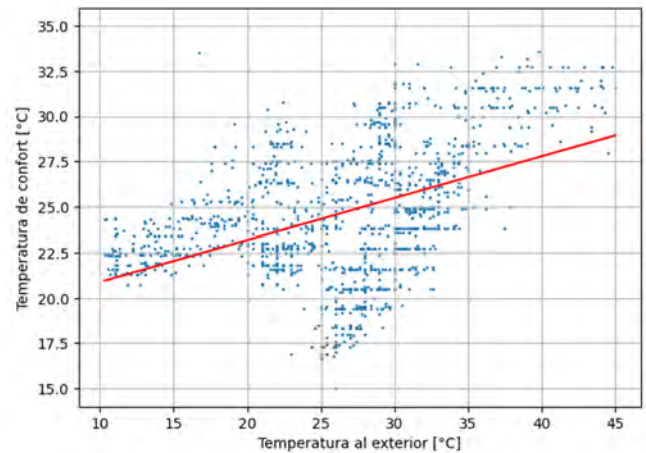


FIGURA 2. Datos y modelo para edificaciones con aire acondicionado. En azul los datos de la base de datos de [20] y en rojo es el modelo desarrollado, dado por la ecuación 9.

La función que mejor correlaciona con los datos es una función lineal (con coeficiente de correlación de Pearson $r = 0.45$), por lo que el modelo que se obtiene es

$$T_c = 18.584^{\circ}\text{C} + 0.2302 T_o, \quad (9)$$

válido en el rango $10.0^{\circ}\text{C} \leq T_o \leq 45.0^{\circ}\text{C}$.

5. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DESARROLLADOS CON ALGUNOS DE LA LITERATURA

En la Figura 3 se presenta la comparación del modelo desarrollado para edificaciones naturalmente ventiladas y los modelos de la literatura presentados en este artículo. En esta comparación se observa que el modelo desarrollado (ecuación 8) es el que tiene mayor rango de validez y presenta valores de T_c menores a todos los modelos, excepto para $T_o < 10^{\circ}\text{C}$. La diferencia máxima es de 2.2°C con el modelo de Humphrey y Nicol (ecuación 1). Se resalta la similar pendiente del modelo desarrollado con el modelo de Cetz y Azpetia (ecuación 6) en el rango de validez de este modelo, con un diferencia cercana a 2.0°C .

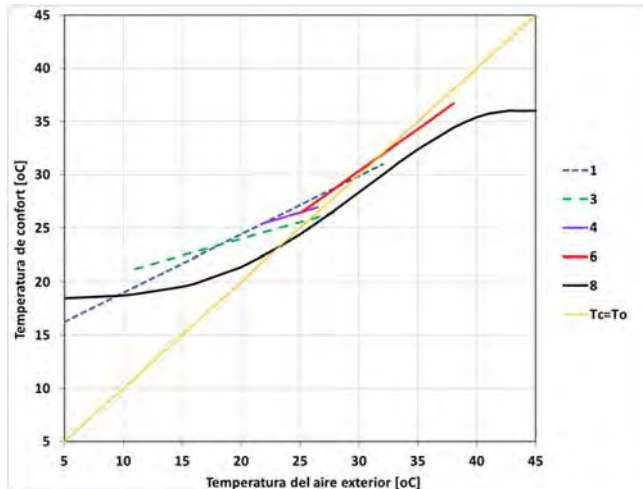


FIGURA 3. Modelos para edificaciones naturalmente ventilados. El número corresponde a la ecuación. Como referencia se incluye la función $T_o = T_c$.

Figura 4 muestra la comparación del modelo desarrollado para edificaciones con aire acondicionado y los modelos de la literatura presentados en este artículo. En esta comparación se observa que el modelo desarrollado (ecuación 9) tiene un rango de validez igual pero para mayor valores de T_o que el modelo de Humphrey y Nicol (ecuación 2), en el rango de validez en que coinciden ambos modelos ($10.0^{\circ}\text{C} \leq T_o \leq 35.0^{\circ}\text{C}$), tienen valores cercanos con diferencia máxima de 1.6°C . El modelo desarrollado presenta menores valores de T_c que los modelos de López-Pérez (ecuación 5) y de Cetz y Azpetia (ecuación 7), con diferencias máximas de 1.9°C y 4.0°C .

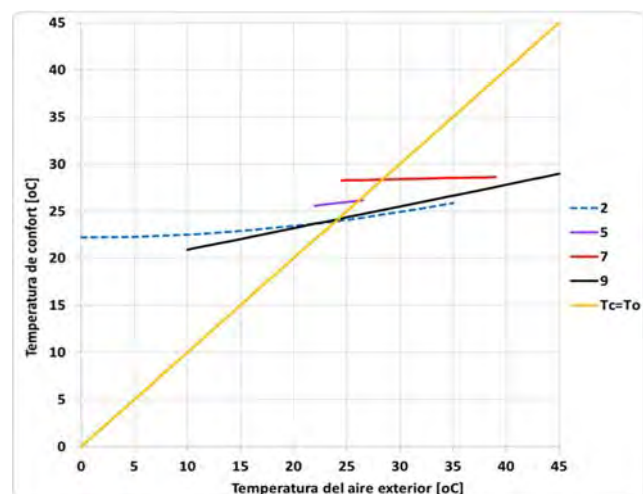


FIGURA 4. Modelos para edificaciones con aire acondicionado. El número corresponde a la ecuación. Como referencia se incluye la función $T_o = T_c$.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como fue discutido por los autores del estudio [20], los resultados tienen ciertas limitaciones. Una de ellas es la cantidad de encuestas, que si bien para México es el estudio que significativamente cuenta con mayor número de datos, pudiera no ser suficiente comparado con estudios internacionales. Otra de las limitaciones es el restringido rango de edades (21 a 25 años), a este hecho puede deberse que los modelos desarrollados aquí predigan valores menores de T_c comparado con modelos de la literatura ya que en general el metabolismo de los jóvenes es mayor al de los adultos.

Como ya se mencionó, la razón para realizar el presente estudio donde se generaron dos modelos de confort térmico para México, uno para edificaciones naturalmente ventiladas y otro para edificaciones con aire acondicionado, es que en el análisis llevado a cabo en [20] se consideran los climas por regiones del país, sin tomar en cuenta el clima real de cada ciudad.

Como mencionan los autores del estudio [20], es importante que en el futuro se lleven a cabo más estudios sobre el confort térmico en México ampliando el rango de edad e incrementando el número de encuestados, y que no se consideren únicamente los modelos adaptativos desarrollados en otros lugares del mundo, los cuáles responden a condiciones climáticas y humanas diferentes al contexto mexicano.

REFERENCIAS

- [1]. Huelsz G and Sierra JA, *Hacia edificaciones más sustentables*. Revista digital Universitaria Vol. 14(9):1-17 (2013). <http://www.revista.unam.mx/vol.14/num9/art29/index.html>
- [2]. Secretaría de Energía, *Balance Nacional de Energía 2023*. (2025). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance_Nacional_de_Energia_2023.FINAL06.02.2025.1.pdf
- [3]. Olgyay V, *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Gustavo Gili, (1998). ISBN: 84-252-1488-2.
- [4]. US Department of Energy (DOE), *EnergyPlus*, (2025). <https://energyplus.net/>
- [5]. Fanger PO, *Thermal comfort*. Danish Technical Press, (1970). ISBN: 8757103410.



- [6]. ANSI/ASHRAE, *ANSI/ASHRAE Standard 55-2023, Thermal environmental conditions for human occupancy* (2023). ISSN: 1041-2336.
- [7]. Center for the built environment (CBE), *CBE Thermal Comfort Tool*. <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>
- [8]. Fanger PO and Toftum J, *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates*, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 533-536, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8).
- [9]. Yao R, Li B and Liu J, *A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive predicted mean vote (aPMV)*, Building and Environment, Vol. 44, pp. 2089-2096, (2009). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.014>.
- [10]. Humphreys MA and Nicol JF, *Outdoor temperature and indoor thermal comfort: Raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies*, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp. 485-492, (2000).
- [11]. Auliciems A and Szokolay SV, *Thermal comfort*, PLEA and University of Queensland. 2 Edition (2007). ISBN: 0-86776-729-4.
- [12]. Secretaria del Trabajo y Previsión Social (STPS), *NOM-001-STPS-2008, Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo, Condiciones de seguridad*. Diario Oficial 24 de noviembre de 2008.
- [13]. H. Becerra-Santacruz and R. Lawrence. *Evaluation of the thermal performance of an industrialised housing construction system in a warm-temperate climate: Morelia, Mexico*. Building and Environment, Vol. 107, pp. 135–153, (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.029>.
- [14]. J. Rincón-Martínez, K. Martínez-Torres, M. González-Trevizo, and F. Fernández-Melchor. *Modelos matemáticos para estimar el confort térmico adaptativo en espacios interiores: Un estudio en la transición térmica de Ensenada, B.C.* Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán, 24(1), pp.1–17, (2020). <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/186>.
- [15]. I. Marincic, J.M. Ochoa, M.G. Alpuche, G. Gomez-Azpeitia, *Adaptive thermal comfort in warm dry climate: economical dwellings in Mexico*, in Proc. 26th International Conference of Passive Low Energy Architecture, 2009.
- [16]. I. Marincic, J.M. Ochoa, M.G. Alpuche, *Passive house for a desert climate*, Trans. Built Environ. 142 (2014) 13–24.
- [17]. I. Marincic, J.M. Ochoa, and J.A. Del Río, *Comfort térmico adaptativo dependiente de la temperatura y la humedad*, ACE, Año 7 núm 20 (2012) pp. 27-46.
- [18]. L. A. López-Pérez, J. J. Flores-Prieto, and C. Ríos-Rojas. *Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate*. Building and Environment, Vol. 150, pp.181–194, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011>.
- [19]. M. G. Cetz and G. G. Azpeitia. *Thermal comfort in classrooms in Mexico's hot and humid climate*. Proc. 10th Windsor Conference: Rethinking Comfort, pp. 669–684, 2018.
- [20]. I. Oropeza-Perez, Petzold-Rodriguez A.H. and Bonilla-Lopez C, *Adaptative thermal comfort in the main Mexican climate conditions with a without passive cooling*, Energy and Buildings, Vol. 145, pp. 251-258, (2017). <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.031>
- [21]. R. Vidal-Zepeda, *Las regiones climáticas de México. México: Temas selectos de geografía de México*, Instituto de Geografía, UNAM (2005).
- [22]. Pearson K, *Note on regression and inheritance in the case of two parents*. Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 58:240-242 (1895).
- [23]. Spearman C, *The proof and measurement of association between two things*. The American Journal of Psychology, Vol. 15(1):72-101 (1904).



Guadalupe Huelsz es Investigadora Titular, integrante del Grupo de Energía en Edificaciones del Instituto de Energías

Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores mexicano. Estudió la licenciatura en Física, maestría y doctorado en Ingeniería Mecánica en la UNAM. Dentro de sus líneas de investigación están los estudios de transferencia de energía y masa en edificaciones, particularmente la transferencia de calor a través de sistemas constructivos de la envolvente y la ventilación natural. Es impulsora del diseño bioclimático como elemento fundamental para la eficiencia energética en edificaciones y así contribuir a la sustentabilidad de las mismas.





Julio Landa. Es ingeniero en mecatrónica con especialización en automatización y maestro en Ingeniería en Energías Renovables por el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM, con enfoque en confort térmico y diseño bioclimático. Ha trabajado en ingeniería eléctrica y como asistente de docencia en cursos relacionados con energías renovables. Participa en proyectos de investigación y construcción relacionados con estrategias bioclimáticas. Además, es docente y tiene interés en la divulgación científica.



Ivan Oropeza Perez. Es profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Estudió la licenciatura en ingeniería en energía en la UAM Iztapalapa, la maestría en energía en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y el doctorado en ingeniería civil en la Universidad de Aalborg, Dinamarca. Sus líneas de investigación son: la ventilación natural como método pasivo de climatización, modelos de confort térmico, enfriamiento radiativo diurno, y sistemas híbridos de climatización natural en edificios.





Homogenización de flujo solar concentrado de un horno solar sobre un reactor cilíndrico

HELENA LUNA GARCÍA¹, LEOPOLDO MARTÍNEZ MANUEL¹, CUITLAHUAC IRIARTE CORNEJO², HEIDI I. VILLAFÁN VIDALES¹, DAVID RIVEROS ROSAS³, CAMILO A. ARANCIBIA BULNES¹

¹Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N, Temixco, Morelos, 62580, México

²Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas J, Calle Av. Rosales, Hermosillo, 83000, Sonora, México

³Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Av. Universidad 3000, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México

Autor de Correspondencia: Leopoldo Martínez Manuel (e-mail: leomar@ier.unam.mx).

Los autores agradecen a la **DGAPA-PAPIIT-UNAM** por el apoyo brindado a través del proyecto **IN107923**. H. Luna García agradece al **SECIHTI** por la beca doctoral otorgada.

RESUMEN En diversas aplicaciones con sistemas de concentración solar, la no uniformidad de flujo solar sobre receptores puede producir estrés térmico, resultando en problemas de durabilidad y bajo rendimiento. El uso de espejos secundarios permite mejorar considerablemente la distribución del flujo solar sobre el receptor y, así, reducir gradientes de temperatura. En este estudio se reporta un análisis numérico comparativo de un espejo cóncavo elíptico y un espejo facetado para la homogenización del flujo concentrado de un horno solar sobre un reactor cilíndrico. El desempeño de los espejos secundarios fue evaluado y optimizado en función de la uniformidad y eficiencia óptica mediante simulaciones por trazado de rayos Monte Carlo. Los resultados mostraron una mejora considerable de la uniformidad del flujo, destacando al espejo facetado con un desempeño superior. Con la implementación del espejo facetado, se logró un aumento en uniformidad de flujo mayor al 80% y una eficiencia relativa superior al 70%. Además, el análisis térmico indicó que el uso del espejo segmentado permitió incrementar la uniformidad de temperatura hasta un 94%. Por tanto, el uso de espejos secundarios contribuye a la reducción de zonas con elevada temperatura, lo que reduce el riesgo de degradación del material y mejora la estabilidad operativa del reactor.

PALABRAS CLAVE: Espejo secundario, Horno solar, Homogenización de flujo solar, Reactor hidrotermal.

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de concentración de energía solar (CSP, por sus siglas en inglés) son elementos clave para garantizar una transición energética sostenible, necesaria para mitigar el cambio climático [1]. Dentro de los sistemas CSP, los hornos solares destacan como instrumentos de investigación en ciencia aplicada y desarrollo tecnológico, ya que permiten, bajo condiciones controladas, estudiar materiales y procesos sometidos a flujos solares altamente concentrados, con aplicaciones en investigaciones térmicas industriales y procesos termoquímicos [2].

Actualmente, el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) lleva a cabo investigaciones en termoquímica solar, incluyendo pirólisis de biomasa y procesamiento hidrotermal (HT) mediante un reactor por lotes [3, 4]. Estos estudios se realizan en el Horno Solar de Alto Flujo del IER-UNAM (HoSIER), el cual proporciona hasta 30 kW de potencia térmica y un flujo solar pico de hasta 18 MW/m², alcanzando aproximadamente 3400 °C [5].

A pesar de los beneficios, los sistemas CSP, como el HoSIER, típicamente producen estrés térmico debido a la distribución no uniforme del flujo solar sobre las paredes del receptor. Además, durante el procesamiento de biomasa, las paredes internas del reactor deben operar a altas presiones, lo que las somete a condiciones de operación demandantes, por lo que es necesario aumentar su espesor [4]. Sin embargo, el aumento del espesor reduce la transferencia de calor y, por tanto, su eficiencia. La homogeneización de flujo solar en receptores cilíndricos representa una brecha de investigación activa, con esfuerzos continuos para resolverla [6]. En homogenización, la dificultad aumenta para sistemas de foco puntual debido a los factores de concentración



elevados; área menos investigada en aplicaciones termoquímicas para receptores tubulares.

Como alternativa, se propone el diseño de un espejo secundario (ES) que ayude a homogeneizar el flujo concentrado sobre las paredes del reactor. Para ello, el ES se coloca en la zona posterior del reactor con el fin de redirigir los rayos solares reflejados por el ES hacia la zona no iluminada por el HoSIER. Se consideran dos diseños distintos de ES: un cono elíptico y un espejo facetado. El objetivo es maximizar la uniformidad del flujo manteniendo al mismo tiempo una eficiencia óptica adecuada. Se exploran múltiples combinaciones de los parámetros libres de estas geometrías mediante simulaciones por trazado de rayos Monte Carlo. Finalmente, se realizan simulaciones térmicas de los mejores casos para evaluar el efecto de homogeneización con respecto a la distribución de temperaturas en la pared del reactor.

2. METODOLOGÍA

2.1. Configuración del sistema

La Figura 1 muestra el esquema del sistema óptico. El horno solar se modeló como un paraboloide rectangular de $6.2 \text{ m} \times 6.2 \text{ m}$ con distancia focal f de 3.68 m . El reactor tiene un diámetro de 6.5 cm y una longitud de 10 cm . La metodología para homogeneizar el flujo solar consiste en desplazar el reactor fuera del foco, acercándolo al vértice del horno, de modo que algunos rayos solares se desborden para después ser redirigidos por el ES hacia la cara no iluminada del reactor.

El análisis óptico se realizó con el método de trazado de rayos Monte Carlo (MCRT, por sus siglas en inglés) usando al Software Tonatiuh [7], considerando una irradiancia directa de 1000 W/m^2 , relación circunsolar de 0.02 y 100 millones de rayos por simulación. Se asignaron reflectancias de 0.68 para el espejo primario (factor de horno que considera pérdidas por obstrucciones y errores de alineación) y 0.92 para el ES, y se contempló un error óptico de 1.1 mrad . El reactor se modeló como un absorbedor perfecto.

2.2. Espejo cónico elíptico

El primer espejo propuesto es un cono elíptico (CE) asimétrico definido por tres parámetros: a (semi-eje mayor), b (semi-eje menor) y h (altura), donde $h = a \tan \theta$, variando θ para obtener diferentes h (Figura 1). Esta geometría permite explorar configuraciones intermedias entre la geometría simétrica del horno y la cilíndrica del receptor. Además, se consideran las distancias h_z , entre vértice del paraboloide y base del cono, y h_{zc} , entre vértice del paraboloide y centro del receptor, ver Figura 1.

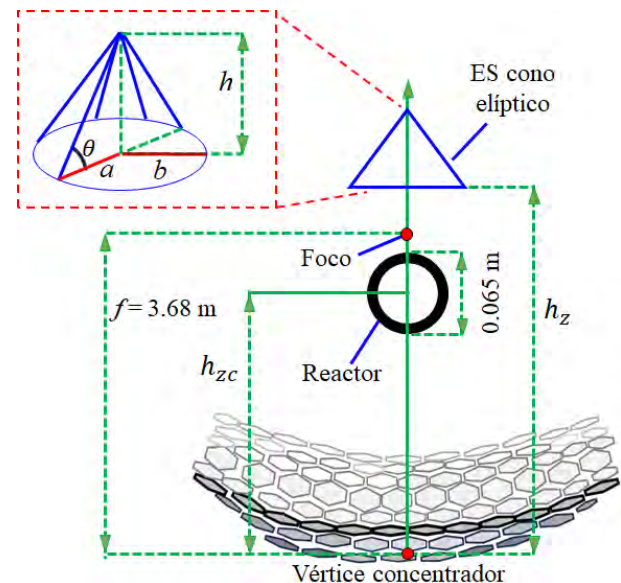


FIGURA 1. Diseño esquemático y parámetros del sistema para el CE.

2.3. Espejo facetado

Por las dificultades de fabricación de superficies curvas, se propone un espejo facetado (EF), compuesto por facetas planas. Este diseño parte de parámetros óptimos del CE (h_z , h_{zc} , a , b). La Figura 2a muestra parámetros de diseño como: ángulos de inclinación θ_m , anchos S_m , e incluye distancias h_z y h_{zc} , los cuales son evaluados mediante un análisis paramétrico. Ya que se requiere controlar varios ángulos θ_m para mejorar la distribución de flujo, el diseño se limita a tres facetas por lado para facilitar su fabricación, además de facetas superior e inferior que forman una cavidad (Figura 2b).

2.4. Optimización del espejo secundario

Tonatiuh permite simular sistemas ópticos mediante scripts, lo que agiliza la exploración y optimización de configuraciones complejas al automatizar las simulaciones [7]. El objetivo es encontrar parámetros óptimos que mejoren la uniformidad del flujo manteniendo la eficiencia óptica por encima de un umbral. Para el CE se evalúan a , b , h , h_z y h_{zc} ; para el EF, θ_1 a θ_3 , S_1 a S_3 , h_z y h_{zc} . La metodología consta de: la generación automática de scripts en Python importados en Tonatiuh con combinaciones de parámetros; la ejecución de simulaciones en Tonatiuh; el procesamiento de resultados con Python para calcular el flujo promedio (Φ), uniformidad óptica (U_0) y eficiencia relativa (η_r).

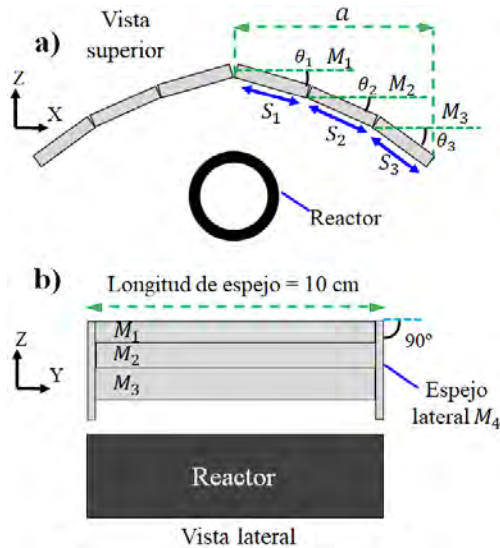


FIGURA 2. a) Diseño de espejo facetado; b) vista lateral de EF y reactor.

La eficiencia óptica relativa, Ecuación (1), se define como el cociente entre la potencia solar absorbida por el receptor que ha sido desplazado del foco (Q_{ES}) y la potencia absorbida por el receptor en el foco sin ES (Q_{rec}). La potencia solar en el foco (Q_{rec}), es la razón de la potencia absorbida por el reactor entre la potencia solar que capta el concentrador del horno. La uniformidad del flujo solar (U_0) es determinada por la Ecuación (2), donde σ_ϕ es la desviación estándar de la distribución del flujo solar sobre la pared del reactor y ϕ es el flujo solar promedio sobre el reactor. Así, una menor desviación σ_ϕ implica mayor uniformidad al reducirse dicha fracción [8]. El objetivo de diseño es alcanzar una uniformidad teórica de $\geq 75\%$, valor promedio reportado en la literatura en receptores cilíndricos [8].

$$\eta_r = \frac{Q_{ES}}{Q_{rec}} \quad (1)$$

$$U_0 = \begin{cases} 1 - \frac{\sigma_\phi}{\phi} & , \quad \sigma_\phi < \phi \\ 0 & , \quad \sigma_\phi \geq \phi \end{cases} \quad (2)$$

2.5. Análisis térmico

Con el uso de ANSYS Workbench se desarrolló un modelo de transferencia de calor conjugada para evaluar la distribución térmica en las paredes del reactor, a partir de los resultados de uniformidad del flujo solar. El reactor HT, creado en Design Modeler, es modelado en acero inoxidable

AISI-316, con 6.5 cm de diámetro exterior, 10 cm de longitud y 1.5 cm de espesor, e incluye una brida superior de 9 cm de diámetro y 6 cm de largo. Se modelaron columnas de aire interna y externa para analizar la transferencia de calor en el fluido y hacia el entorno.

En ANSYS Meshing, se generó una malla tetraédrica con refinamiento local (inflation) en las interfaces aire-reactor. La calidad se evaluó mediante relación de aspecto promedio (1.846), skewness (0.226) y ortogonalidad (0.773), todos en rangos adecuados [9]. La Tabla 1 muestra el análisis de independencia de malla; al incrementar los elementos de 709,200 a 954,774 se producen variaciones térmicas menores a 0.03%, por lo que se usó la primera por su eficiencia.

TABLA 1. Análisis de independencia de malla.

Elementos de malla	Reactor (°C)	Aire interno (°C)	ΔT Reactor (%)
38×10^3	321.93	317.75	1.67%
274×10^3	323.48	318.91	1.20%
536×10^3	326.55	322.17	0.27%
709×10^3	327.32	322.84	0.03%
954×10^3	327.42	322.86	0%

El modelado térmico se realizó en Fluent 19 con un modelo 3D en estado estacionario que incluye aceleración gravitacional. Las propiedades térmicas dependientes de temperatura se definieron mediante funciones UDFs. Para la radiación, se empleó el modelo S2S, considerando factores de visión. Los flujos obtenidos con Tonatiuh se integraron como fuente de calor superficial (espesor 10^{-6} m), con emisividad de 0.95. Se usaron perfiles ajustados a potencias de 0.25 a 1 kW y aperturas de cortina del HoSIER de 20–30 %.

Se utilizó el solucionador basado en presión, esquema COUPLED y discretización Body Force Weighted. El balance energético mostró un desbalance de solo 0.073 W (0.022 % de la potencia), indicando buena convergencia. Las simulaciones se realizaron en doble precisión para reducir errores numéricos

3. RESULTADOS

3.1. Optimización óptica de espejos

La optimización óptica se realizó variando los cinco parámetros libres del cono elíptico. Todas las combinaciones posibles fueron evaluadas mediante simulaciones ejecutadas con scripts en Tonatiuh. Las distancias y longitudes se ajustaron en incrementos de 0.01 m: el parámetro a entre 0.03 y 0.09 m, el parámetro b entre 0.03 y 0.12 m, h_z de 3.65 a 3.72 m, y h_{zc} de 3.58 a 3.64 m. El ángulo θ se varió de 3° a 75° en pasos de 3° , excluyendo casos que generaron conos

con altura superior a 1 m. Asimismo, se descartaron configuraciones con uniformidad nula (véase Ecuación (2)).

La Figura 3 muestra el comportamiento de la uniformidad y eficiencia al modificar cada parámetro por separado. En cada gráfica, cuatro de los cinco parámetros permanecen fijos, mientras se analiza el efecto del quinto. Se observa que todos los parámetros presentan máximos de uniformidad dentro de los rangos explorados. El análisis

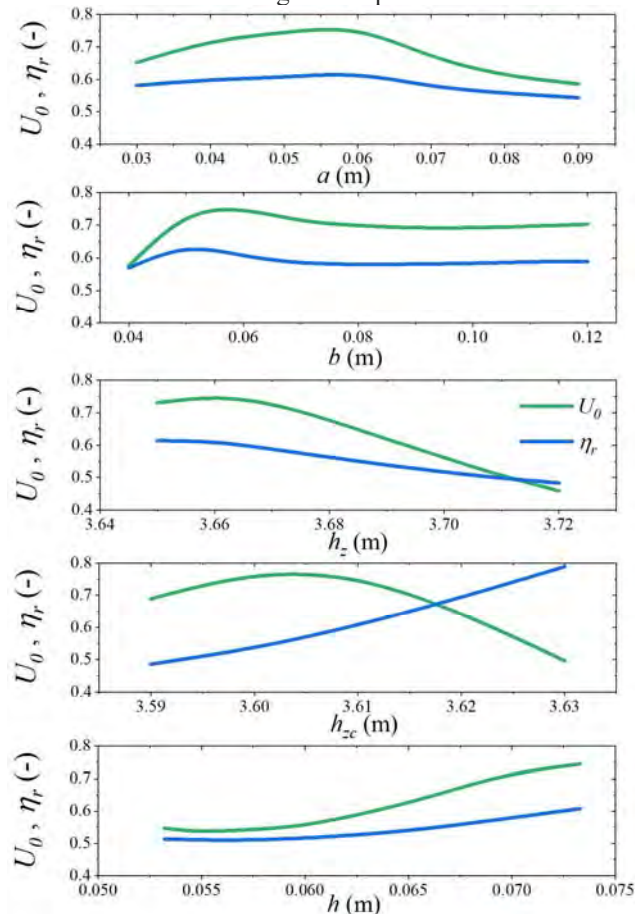


FIGURA 3. Efecto en la modificación de parámetros del CE sobre la uniformidad de flujo solar y eficiencia relativa.

logró uniformidades de flujo entre 76% y 78%, con eficiencias que varían entre 50% y 62%. En el caso con mayor uniformidad, la desviación estándar σ_Φ se redujo en un 92% respecto al sistema sin espejo secundario. Dado que el objetivo principal del estudio es mejorar la uniformidad, este parámetro recibió mayor énfasis durante la evaluación.

La exploración de configuraciones para el espejo facetado fue más limitada, debido a que posee tres parámetros libres adicionales respecto al CE. A partir de los mejores resultados obtenidos para el CE, se estableció como punto de partida

una posición del centro del receptor (h_{zc}) a 3.61 m del vértice del concentrador. Asimismo, los parámetros de apertura del ES se fijaron en rangos similares a los valores óptimos de $2a$ y $2b$ del CE: 10–12 cm y 12–14 cm, respectivamente. Finalmente, se delimitó la distancia h_z a un intervalo de 3.65 a 3.68 m.

Para redirigir los rayos desbordados hacia el reactor, se inició inclinando el espejo plano M_1 (Figura 2b) a un ángulo θ_1 para maximizar los impactos de rayos sobre la parte posterior del reactor, mientras su longitud S_1 se minimizó para evitar sombras innecesarias. Este procedimiento se repitió para las facetas M_2 y M_3 . Dado que la radiación que incide sobre el ES proviene de un sistema de foco puntual, parte de ella se pierde en el EF de tipo canal. Por ello, se añadieron facetas M_4 en las zonas superior e inferior (Figura 2c).

La longitud del EF se redujo a 10 cm (Figura 2b) para lograr un conjunto reactor-espejo más compacto, ya que dicha modificación disminuyó la uniformidad solo en un 0.33 % respecto al valor óptimo. Las facetas del espejo se definieron del siguiente modo: M_1 con un ancho S_1 de 3.2 cm y ángulo θ_1 de 18°; M_2 con S_2 de 2.0 cm y θ_2 de 28°; M_3 con S_3 2.7 cm, y θ_3 76°; y M_4 con S_4 de 5.6 cm, longitud de 11 cm y $\theta_4 = 90^\circ$.

TABLA 2. Rendimiento del sistema con y sin espejo secundario.

Parámetro	Sin ES	CE	EF
$2a$ (m)	—	0.10	0.11
$2b$ (m)	—	0.12	0.10
θ (°)	—	50.70	—
h (m)	—	0.0733	0.0456
h_z (m)	—	3.66	3.66
h_{zc} (m)	3.68	3.61	3.61
Φ (kW/m ²)	1,229	600	816
σ_Φ	2,070	129	128
U_0	0	0.746	0.843
η_r	1	0.612	0.717

La Tabla 2 compara el diseño final del espejo facetado (EF) con el mejor caso del cono elíptico. El EF muestra un rendimiento superior tanto en uniformidad como en eficiencia: la uniformidad mejora en 8.3 % y la eficiencia en 36 % respecto al CE. Los niveles promedio de flujo solar son adecuados para los rangos de temperatura requeridos, como se analizará más adelante.

La Figura 4 muestra las distribuciones de flujo para el CE y el EF, en comparación con el sistema sin espejo secundario. En la Figura 4a, se observa que sin ES el índice de uniformidad tiende a cero, con una alta concentración de flujo en una región reducida en el centro. En contraste, las

Figuras 4b y 4c evidencian una mejora sustancial al incorporar espejos secundarios, logrando una distribución más homogénea sobre zonas previamente poco expuestas. Esta comparación destaca la efectividad de los ES para mejorar la distribución del flujo solar, haciéndola más uniforme.

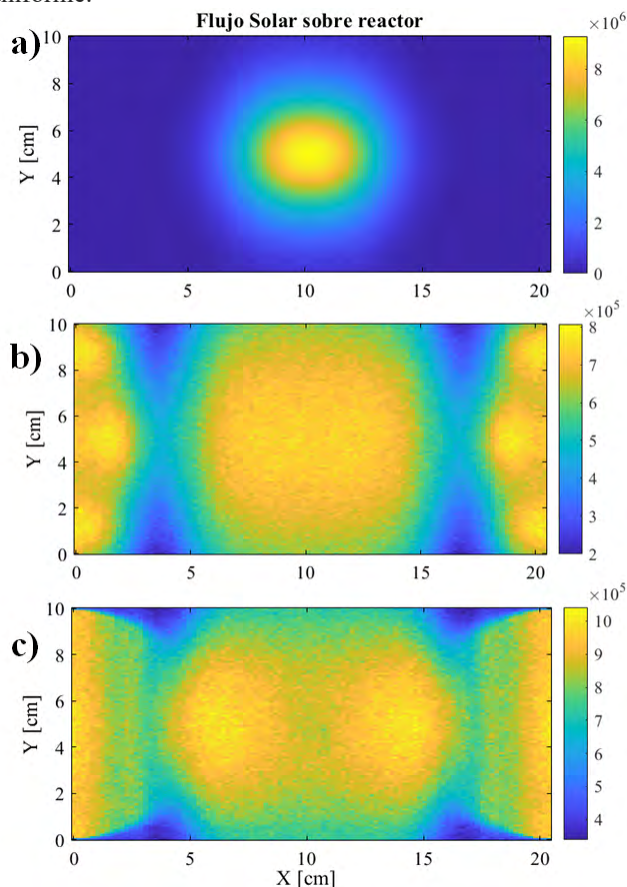


FIGURA 4. Comparación de distribución de flujo solar para el receptor sin ES (a), con espejo de CE (b) y con espejo facetado EF (c). Notar que la escala es diferente en las 3 gráficas.

La Figura 5 compara las secciones transversal horizontal y vertical de la distribución de flujo solar sobre el receptor para un sistema sin ES y otro con los dos tipos de espejo. El EF logró la mayor uniformidad óptica registrada (84.3 %), una reducción del flujo pico de 89 % y una eficiencia óptica relativamente alta (71.7 %). Por ello, este diseño fue elegido para la simulación térmica.

Pereira et al. [8] reportaron hasta un 91 % de uniformidad empleando un ES de cuatro caras sobre un receptor plano, aunque el sistema sin ES ya alcanzaba aproximadamente un 85 %. Esta mejora proviene de seleccionar únicamente la región central del foco, descartando el flujo no uniforme y,

en consecuencia, reduciendo la energía capturada. Por su parte, Domingos et al. [9] obtuvieron hasta un 77 % de uniformidad utilizando un ES parabólico en el SF60. En contraste, el ES facetado propuesto en este trabajo elimina las limitaciones de fabricación asociadas a geometrías curvas y alcanza una uniformidad del 84 % en un reactor cilíndrico.

3.2. Resultados de la simulación térmica

Se realizaron simulaciones térmicas de la distribución de temperatura sobre las paredes del reactor, utilizando los perfiles de flujo solar generados en Tonatiuh. Este estudio incorpora las condiciones experimentales del horno solar, considerando aperturas de cortina del 20 % y 30 %, rangos típicos para el procesamiento hidrotermal de biomasa a potencias entre 0.25 y 0.92 kW [10].

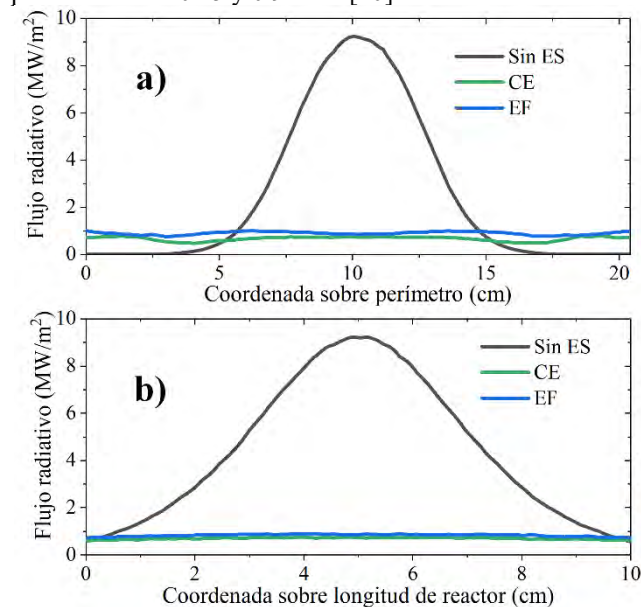


FIGURA 5. Perfiles de distribución de flujo solar sobre cortes transversales del receptor: a) horizontal y b) vertical.

La Figura 6 muestra los contornos de temperatura sobre las paredes del reactor con una apertura del 20 %. Las Figuras 6a y 6b corresponden a las caras frontal y posterior, respectivamente, cuando el reactor está ubicado en el foco del horno sin ES. En este caso, la temperatura máxima en la cara frontal es de 551.83 °C y la mínima en la posterior es de 247.82 °C, con una diferencia de 304 °C. La temperatura promedio es de 329 °C, con una desviación estándar de 60.53 °C, estimando una uniformidad térmica del 81.76 % [Ecuación (2)]. Las Figuras 6c y 6d muestran los contornos correspondientes al uso del espejo facetado en su ubicación de diseño ($h_{zc} = 3.61$ m). En este caso, las temperaturas máxima y mínima en la pared del reactor son 286.36 °C y

244.15 °C, respectivamente, con una diferencia de solo 42.21 °C. La uniformidad térmica alcanza el 94.72 %, con desviación estándar de 14.56 °C y una temperatura promedio de 275.97 °C. En resumen, la incorporación del ES mejora la uniformidad térmica en 12.96 % y reduce la diferencia de temperatura en 86 %.

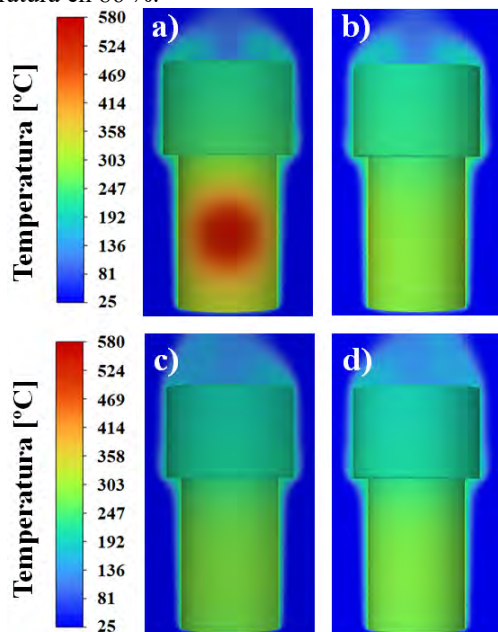


FIGURA 6. Temperaturas sobre el reactor con apertura de cortina de 20%: sin ES parte frontal (a) y posterior (b); con EF frontal (c) y posterior (d).

La Figura 7 presenta la distribución de temperaturas sobre el perímetro del reactor, con y sin el uso del ES, a 5 cm por encima de la base, correspondiente a la altura de máxima concentración solar. Sin ES, la distribución es de tipo gaussiana, con una diferencia de temperatura de 261.55 °C. En contraste, el uso del ES genera un perfil mucho más uniforme, con una diferencia de solo 2.74 °C, lo que representa una reducción del 98.95 % en dicha sección perimetral.

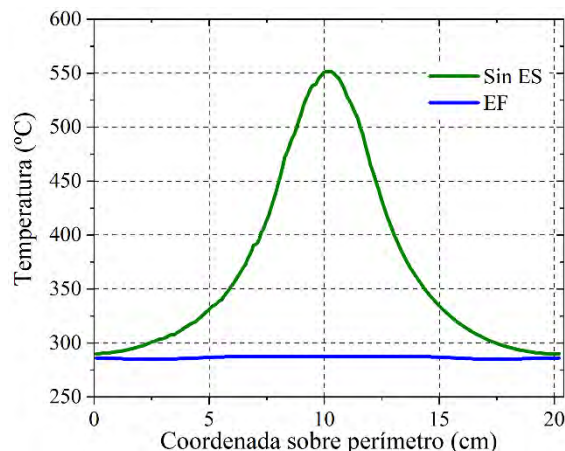


FIGURA 7. Comparación de distribución de temperaturas sobre el perímetro del reactor, con y sin espejo secundario facetado.

Para llevar a cabo el procesamiento hidrotermal, es necesario alcanzar temperaturas en las paredes del reactor entre 350 y 500 °C, las cuales no son alcanzables con una apertura de 20%, ver Figura 7. La Figura 8 muestra los contornos de temperatura con el uso del espejo secundario y una apertura de cortina del 30 %. Las Figuras 8a y 8b corresponden a la configuración sin ES y apertura del 20 %, previamente analizadas en la Figura 6, mientras que las Figuras 8c y 8d presentan los resultados con el EF y una apertura del 30 %. En este último caso, la temperatura promedio en la pared del reactor es de 532.51 °C, con una desviación estándar de 33.63 °C, lo que da lugar a una uniformidad térmica del 93.65 %. Esta homogenización minimiza el esfuerzo térmico localizado, lo cual es crucial para mantener la integridad estructural del reactor bajo condiciones de alta temperatura y abre la posibilidad de reducir el espesor de las paredes sin comprometer la seguridad, lo que mejoraría la transferencia de calor y favorecería un diseño mecánico más eficiente.

Aunque el gradiente térmico aumenta con la apertura, la uniformidad solo disminuye un 1.07 %. Estos resultados indican que una apertura del 30 % es adecuada para realizar procesamiento hidrotermal de biomasa con el diseño de reactor y ES propuesto. Trabajos previos han analizado los parámetros de operación en los que el reactor proporciona un excelente rendimiento de conversión de biomasa (bagazo de agave), tales como temperatura, tiempo de residencia, concentración de biomasa [4]. Las condiciones más favorables para incrementar los rendimientos (28%) se logran con aperturas de cortina entre 20 y 30%, permitiendo alcanzar temperaturas de ~300°C con una tasa de calentamiento promedio de 1.7 °C/min.

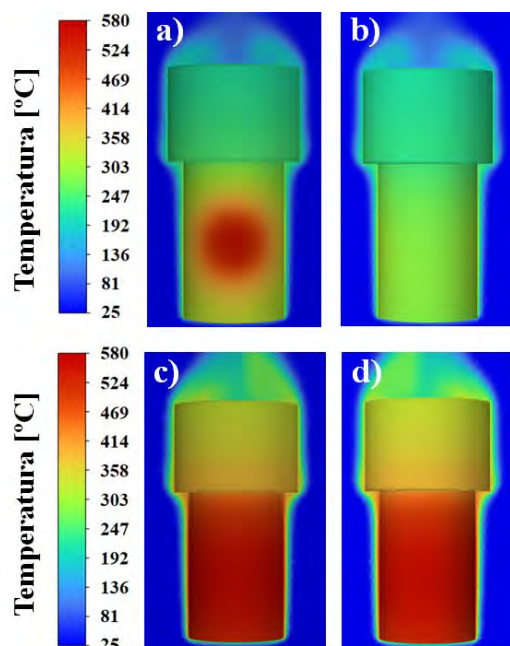


FIGURA 8. Temperaturas sobre el reactor con apertura de cortina de 20%: sin ES parte frontal (a) y posterior (b); y con apertura de 30%: con EF parte frontal (c) y posterior (d).

4. CONCLUSIONES

En este estudio se demostró numéricamente la uniformización del flujo solar concentrado sobre un reactor cilíndrico acoplado a un horno solar mediante el uso de espejos secundarios. Utilizando análisis por trazado de rayos y evaluando su desempeño óptico, se optimizó un ES cónico elíptico y un ES facetado. El espejo facetado mostró los mejores resultados, al incrementar la homogeneidad del flujo solar hasta un 84.3 %, con una eficiencia óptica relativa de 71.7 %. El ES propuesto es compacto y de fácil fabricación, ya que evita superficies curvas complejas. Además, el análisis térmico demostró que la implementación del ES mejora significativamente la distribución de temperatura en las paredes del reactor, al reducir los gradientes térmicos hasta en un 86 % y mejorar la uniformidad térmica en un 12.96 %. Esta homogenización minimiza el esfuerzo térmico localizado, lo cual es crucial para mantener la integridad estructural del reactor bajo condiciones de alta temperatura.

REFERENCIAS

Artículos

- [1]. Lee L, Ingenhoven P, Tian Z, Sun Z, Chinnici A, Jafarian M, Ashman P, Potter D, Saw W, *Pathways to the use of concentrated solar heat for high temperature industrial processes*. Solar Compass **5**, 100036 (2023). [10.1016/j.solcom.2023.100036](https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100036).
- [2]. Riveros-Rosas D, Herrera-Vázquez J, Pérez-Rábago CA, Arancibia-Bulnes CA, Vázquez-Montiel S, Sánchez-González M, Granados-Agustín F, Jaramillo OA, Estrada CA, *Optical design of a high radiative flux solar furnace for Mexico*. Solar Energy **84**:792–800 (2010). [10.1016/j.solener.2010.02.002](https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.002).
- [3]. Martínez-Casillas D, Mascorro-Gutiérrez I, Arreola-Ramos CE, Villafán-Vidales HI, Arancibia-Bulnes CA, Ramos-Sánchez V, Cuentas-Gallegos AK, *A sustainable approach to produce activated carbons from pecan nutshell waste for environmentally friendly supercapacitors*. Carbon **148**:403–412 (2019). [10.1016/j.carbon.2019.04.017](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.04.017).
- [4]. Ayala-Cortés A, Arcelus-Arrillaga P, Millan M, Okoye P U, Arancibia-Bulnes C A, Pacheco-Catalán D E, Villafán-Vidales H I, *Solar hydrothermal processing of agave bagasse: Insights on the effect of operational parameters*. Renewable Energy **192**:14–23 (2022). [10.1016/j.renene.2022.04.059](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.059).
- [5]. Pérez Enciso R, *Caracterización óptica y térmica del horno solar del IER*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, México (2015).
- [6]. He Y-L, Wang K, Qiu Y, Du B-C, Liang Q, Du S. *Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions*. Applied Thermal Engineering. **149**:448–474 (2019). [10.1016/j.applthermaleng.2018.12.006](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.006).
- [7]. CENER. A Monte Carlo ray tracer for the optical simulation of solar concentrating systems. Disponible en: <https://iat-cener.github.io/tonatiuh/> (2024).
- [8]. Martínez-Manuel L, Córdova-Gallegos J, Santos A, Riveros-Rosas D, Canavarró D, Horta P, Arancibia-Bulnes CA, *Secondary mirrors for homogenization of parabolic trough radiative flux distributions on cylindrical receivers*. Solar Energy **287**, 113209 (2025). [10.1016/j.solener.2024.113209](https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113209).
- [9]. ANSYS Inc. ANSYS Fluent User's Guide, sección 6.2.2, Mesh Quality (2023). Disponible en: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>.
- [10]. Pereira JCG, Rodríguez J, Fernandes JC, Rosa LG, *Homogeneous flux distribution in high-flux solar*



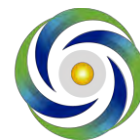
- furnaces. *Energies* 13(2) (2020). 10.3390/en13020433.
- [11]. Domingos G, Pereira JCG, Rosa PAR, Rodríguez J, Rosa LG, Experimental validation of double paraboloid reflection for obtaining quasi-homogeneous distribution of concentrated solar flux. *Energies* 16(9) (2023) 3927. 10.3390/en16093927.
- [12]. Hernández Figueroa E, *Sistema de evaluación rápida de flujo solar concentrado con enfriamiento por aire*, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México (2024).



Helena Luna García. El Grupo de Concentración Solar del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM), ubicado en Temixco, Morelos, México, se dedica al desarrollo de tecnologías de concentración solar y química solar. Este grupo cuenta con una sólida infraestructura para la investigación, desarrollo e innovación en sistemas solares de concentración, entre los que destaca el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER), una instalación

única en América Latina. La labor del grupo busca impulsar la transición energética mediante la generación de conocimiento científico y tecnológico aplicado. Helena Luna García es ingeniera en Telemática por la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional (Ciudad de México, México). Posteriormente, obtuvo la maestría en Energía en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, donde comenzó a desarrollar su interés por las fuentes renovables de energía. Actualmente cursa el doctorado en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (Morelos, México), enfocándose en el diseño y evaluación de sistemas de concentración solar de alto flujo radiativo. Previo a su trayectoria académica en el sector energético, se desempeñó como desarrolladora de software y consultora tecnológica en diversas instituciones, tales como Telcel, Grupo Carso, el Instituto Nacional Electoral y la Secretaría de Energía (SENER), donde participó en proyectos de desarrollo de sistemas informáticos y análisis de datos. Ha colaborado en proyectos relacionados con cocinas solares, desarrollo de prototipos sostenibles y divulgación científica. Sus principales intereses giran en torno al diseño de sistemas solares asequibles y al desarrollo de tecnología que favorezca la accesibilidad energética.





Revalorización del bagazo de malta cervecera para la producción de bioetanol

CATHERINE ROSAS, JAEI BLANCAS, MANUEL ACOSTA, OSCAR GUTIERREZ, GRISEL MARTÍNEZ, CARLOS SATOLALLA, JONAS MARTÍNEZ

¹Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD) Instituto Politécnico Nacional/ Laboratorio de Biorreactores Ambientales/ Departamento de Biociencias e Ingeniería/ 07340, Ciudad de México, MÉXICO.

Autor de Correspondencia: Catherine Rosas Gómez (e-mail: crosasg1701@alumno.ipn.mx).

El CIIEMAD-Instituto Politécnico Nacional agradece el apoyo otorgado mediante los proyectos SIP-IPN 20250083 y SIP-IPN 20250291.

RESUMEN Se evaluó la viabilidad de producir un biocombustible de segunda generación a partir de residuos de malta cervecera, mediante hidrólisis ácida y enzimática. Se analizaron muestras de cervezas claras y oscuras con diferentes relaciones sólido-líquido. La hidrólisis con ácido sulfúrico mostró mejores resultados que con ácido cítrico, siendo sus condiciones óptimas: relación 1:3, pH 1.96, 92 °C y 1 hora. La hidrólisis enzimática con amiloglucosidasa, en condiciones óptimas (1:2, pH 5.5, 55 °C, 2 horas), generó una mayor concentración de azúcares fermentables, sin embargo, con la combinación de ambos métodos se agota el almidón y con ello alcanza la máxima concentración de azúcares, los cuales fueron aprovechados por *Saccharomyces cerevisiae* durante la fermentación, obteniéndose así el bioetanol deseado, el cual fue separado mediante un proceso de destilación.

PALABRAS CLAVE: Hidrólisis ácida, Hidrólisis enzimática, Fermentación alcohólica, Biocombustible de segunda generación, Bioetanol.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente producción cervecera en México genera grandes cantidades de bagazo, que representa hasta el 85 % de los residuos del proceso.^[1] Una gestión inadecuada de este subproducto puede provocar impactos ambientales. Ante ello, en el presente trabajo de investigación se propone su revalorización mediante la producción de bioetanol como biocombustible de segunda generación.

México es uno de los principales exportadores mundial de cerveza, con un crecimiento sostenido en su industria.^[2] Esta actividad genera grandes volúmenes de residuos, siendo

el bagazo de malta el más representativo, con 20 kg por cada 100 litros de cerveza producidos.^[3] Su alto contenido de humedad y azúcares fermentables lo convierte en una materia prima viable para la producción de bioetanol. Sin embargo, gran parte de estos residuos orgánicos no se gestionan adecuadamente, contribuyendo a emisiones de gases de efecto invernadero por descomposición anaeróbica.^[4]

Una gestión inadecuada de este residuo puede ocasionar problemas ambientales, como la generación de lixiviados y gases contaminantes, contribuyendo a la contaminación ambiental. Es por lo que la revalorización de la cebada residual para producir bioetanol enfrenta diversos desafíos tales como la falta de información sobre la combinación óptima de métodos de hidrólisis.

El bioetanol es un biocombustible líquido que se obtiene mediante la fermentación de materias ricas en glucosa, almidón y/o celulosa. Para producirlo a partir de residuos orgánicos es necesario realizar pretratamientos que permitan la liberación de fermentables como pueden ser métodos de hidrólisis, la cual puede ser ácida o enzimática. La hidrólisis ácida consiste en aplicar un ácido fuerte, como ácido sulfúrico o clorhídrico, y someter la mezcla a temperaturas superiores a 100 °C durante un tiempo prolongado. En cambio, la hidrólisis enzimática utiliza enzimas que realizan cortes específicos en la cadena de almidón generando azúcares fermentables y no fermentables; estas enzimas pueden provenir de un solo microorganismo, de consorcios microbianos o de organismos modificados genéticamente, y requieren condiciones controladas de pH y temperatura para evitar su desnaturalización. Independientemente del tratamiento aplicado, se lleva a cabo una fermentación alcohólica utilizando levaduras en condiciones anaeróbicas para posteriormente realizar una destilación que permita separar el bioetanol obtenido del medio fermentado.





2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se realizaron tres tipos de pruebas de hidrólisis: hidrólisis ácida, hidrólisis enzimática y una combinación de ambas.

La biomasa utilizada en el presente trabajo fue obtenida de cervezas claras y oscuras, almacenada en cubetas sanitizadas para evitar su contaminación. Las pruebas se realizaron a nivel laboratorio, usando parrillas, termómetros y vasos de precipitado, y nivel planta piloto, con tanques de 60 L y hornillas. La medición de densidad se realizó con un refractómetro. Para la hidrólisis ácida se utilizó H_2SO_4 y se realizaron pruebas de neutralización con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (cal hidratada). En la hidrólisis enzimática se emplearon amiloglicosidas de White Labs y el complejo enzimático Brutzyme de Cellar Science compuesto por amiloglicosidasa, α -amilasa y pululanasa.

2.1. Hidrólisis ácida

Se realizaron diferentes ensayos en donde se determinó el ácido a utilizar, rangos de temperatura, tiempo de operación, relación disolvente – agua y concentración de ácido.

Determinación del ácido a utilizar

Se realizaron dos ensayos a nivel planta piloto con una relación sólido – líquido 1:6, con un rango de temperatura de 70 – 75°C. Al primero se le adicionó $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, mientras que al segundo se le agregó H_2SO_4 . Ambos se realizaron por hora y media, midiendo densidad con refractómetro cada 30 min.

Determinación de rangos de temperatura y tiempo

Se tomó como referencia el estudio realizado por Aguilera & Canizales (2004)^[5] y se realizaron pruebas en planta piloto a diferentes rangos de temperatura (50 – 55°C, 60 – 65°C y 70 – 75°C), manteniendo la misma relación sólido – líquido 1:6 y pH de 5 – 5.5 utilizando H_2SO_4 . El tiempo de operación en la primera prueba fue de 3 horas con toma de muestra cada hora, mientras que en los últimos fue de 2 horas y medición de densidad cada 30 min.

Determinación de relación residuo – disolvente

Se realizaron pruebas a nivel laboratorio utilizando relaciones sólido – líquido 1:3 y 1:2. Ambas pruebas se realizaron a una concentración de 0.1% v/v de H_2SO_4 , rango de temperatura de 88 – 92°C durante 60 minutos, midiendo densidad cada 10 min.

Determinación de concentración de ácido y pruebas de neutralización

Se realizaron ensayos a nivel laboratorio utilizando residuos de dos tipos de cerveza, una clara y otra oscura. En ambos casos se probaron diferentes concentraciones de H_2SO_4 (1%, 0.5% y 0.1% v/v), conservando las condiciones establecidas

de acuerdo con las pruebas anteriores (relación 1:2, 88 – 92°C, 60 min.) y tomando muestras cada 10 min.

Además, al finalizar cada prueba se realizaron diferentes adiciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (desde 0.65 hasta 3 g aproximadamente) para elevar el pH al solicitado por la enzima (4 – 5.5).

2.2. Hidrólisis enzimática

El ensayo a nivel laboratorio se llevó a cabo bajo las condiciones óptimas de operación de la enzima amiloglicosidasa de White Labs (pH 5.5 y 50 – 60°C), utilizando una relación 1:2 durante 120 min.

2.3. Combinación de métodos de hidrólisis

Se realizaron ensayos a nivel laboratorio previo a llevar el proceso a planta piloto. Se inició con la hidrólisis ácida a las condiciones determinadas anteriormente (0.5% v/v de H_2SO_4 , 88 – 92°C, relación 1:2, 50 min). Posteriormente se añadieron 0.65 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se agitó por 10 min a temperatura de 72 – 80°C y se dejó 20 minutos en reposo sin aplicar calor. Se llevó a cabo una hidrólisis enzimática añadiendo 0.1 mL de amiloglicosidasa de White Labs a sus condiciones óptimas (pH 4.28, 55 – 60°C) durante 10 min.

Después se replicó la prueba a nivel planta piloto con las mismas condiciones tanto en hidrólisis ácida como en enzimática. Al finalizar ambas etapas, se sometió a un enfriamiento utilizando intercambiadores de calor de placas para vaciar el medio hidrolizado en el fermentador.

2.4. Monitoreo de fermentación

Se realizaron tomas de muestra de 100 mL cada día para medir la densidad del medio con un densímetro. Una vez que la densidad iguala a la del agua, se detiene el proceso de fermentación.

2.5. Destilación

Se vierte el medio fermentado en el destilador de una etapa con capacidad de 50 L, se conectó un sistema de enfriamiento con agua helada para el condensador y se sostuvo un recipiente donde se recopiló el destilado.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Efecto del tipo de ácido empleado

Se comparó la eficacia del **ácido cítrico (AS1C)** y el **ácido sulfúrico (AS1S)** para la hidrólisis de residuos de cervezas claras, operando ambos a temperaturas entre 70 y 75 °C.

Inicialmente, el ácido cítrico mostró una mayor liberación de azúcares, pero esta concentración se estancó rápidamente. En contraste, el ácido sulfúrico permitió una hidrólisis continua del almidón, resultando en un aumento gradual, incluso a temperaturas consideradas subóptimas.

Por lo cual el **ácido sulfúrico es más efectivo** para esta aplicación de hidrólisis ácida, no solo por su mayor capacidad para hidrolizar el almidón, sino también porque se requiere en menor cantidad. Un estudio de Golachowski et al. (2020) apoya esto, señalando que el ácido cítrico puede modificar el almidón a través de reacciones de esterificación, creando almidón resistente a las enzimas, lo que limita su conversión en azúcares fermentables.

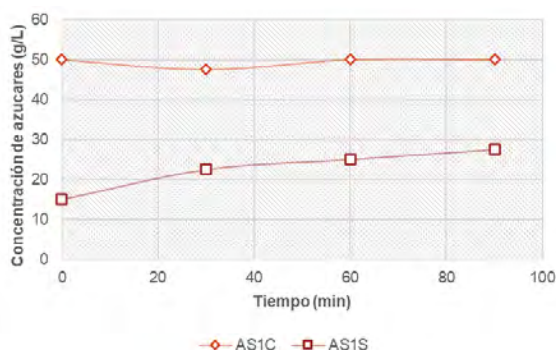


FIGURA 1. Comparación de la Extracción de Azúcares aplicando dos diferentes ácidos (Ácido cítrico y ácido sulfúrico).

3.2. Efecto de la temperatura y tiempo de operación

Para determinar la temperatura óptima de operación, se realizaron tres pruebas: **AT1** (50-55 °C), **AT2** (60-65 °C), y **AT3** (70-75 °C). Los resultados mostraron que la temperatura más alta (70-75 °C) en la prueba AT3 resultó en una mayor liberación de azúcares, confirmando que el calor favorece la ruptura de los enlaces del almidón. Aunque un estudio previo (Aguilera & Canizales, 2004) indicó una temperatura óptima de 110 °C, por lo que se planteó el punto de partida de 70-75°C incrementándose posteriormente hasta el límite operativo del sistema (90-92 °C).

Además, se determinó que no es necesario prolongar el contacto del ácido con el residuo, ya que una hidrólisis prolongada puede degradar los azúcares liberados y reducir el rendimiento. Estudios previos (Fissha & Jabasingh, 2018; Bedó et al., 2021) advierten que tiempos largos y altas temperaturas generan subproductos tóxicos e inhibidores. Por

ello, se optó por un **pretratamiento ácido de 30 minutos** para maximizar los azúcares fermentables y evitar su degradación.

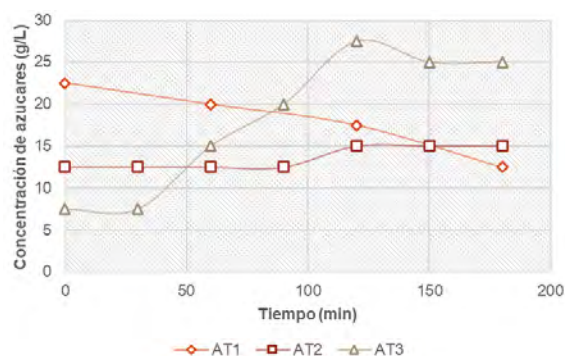


FIGURA 2. Comportamiento de la Extracción de Azúcares aplicando diferentes rangos de temperatura

3.3. Efecto de la relación residuo - disolvente

Se investigó la relación residuos-disolvente en la hidrólisis ácida. Pruebas previas con una relación de 1:6 mostraron baja producción de azúcares. Por lo cual se evaluaron dos nuevas relaciones, 1:3 (**AR1**) y 1:2 (**AR2**), utilizando residuos de cervezas oscuras con una concentración de ácido del 0.1% y temperaturas entre 80 y 92 °C.

La relación 1:3 produjo buenos rendimientos de azúcares, pero requirió más tiempo. Por otro lado, la relación 1:2 logró concentraciones de azúcares similares en menos tiempo, con menor consumo de agua y permitiendo revalorizar mayor cantidad de residuos. Por estas ventajas, se determinó que la **relación 1:2 es la más viable** para el escalado del proceso.

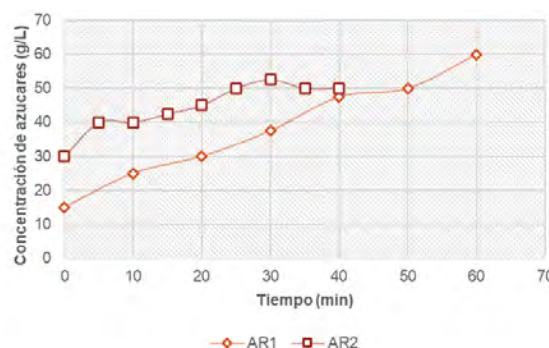


FIGURA 3. Comportamiento de la Extracción de Azúcares aplicando diferentes relaciones residuo-disolvente

3.4. Efecto de la concentración de ácido

Para encontrar la concentración óptima de ácido sulfúrico, se realizaron pruebas con diferentes concentraciones para residuos de cerveza oscura y clara. En los residuos de cerveza oscura (a), se probaron concentraciones de 0.1% (ACO1), 0.5% (ACO2) y 1% (ACO3). Para los residuos de cerveza clara (b), se evaluaron concentraciones de 0.1% (ACC1), 0.5% (ACC2) y 1% (ACC3).

En ambos tipos de residuos, la **concentración del 0.5%** demostró el mejor rendimiento, logrando la máxima concentración de azúcares en el menor tiempo.

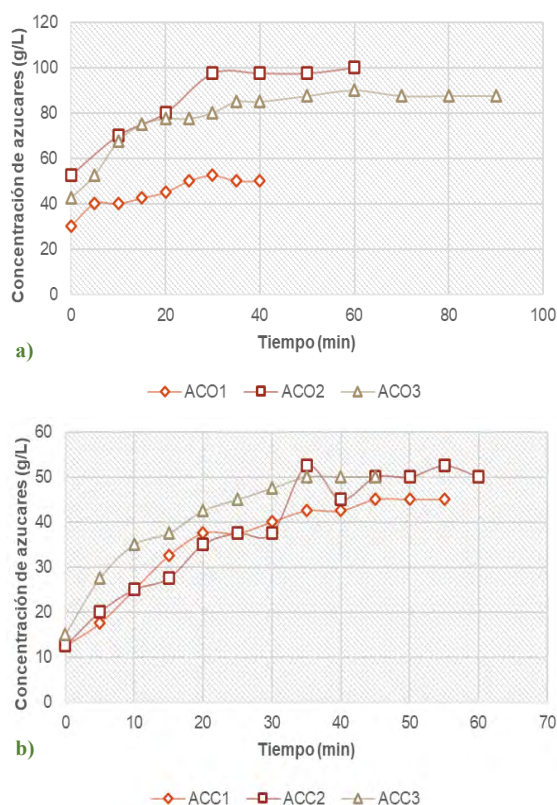


FIGURA 4. Comparación de la Extracción de Azúcares aplicando diferentes concentraciones de ácido (cerveza tipo oscura y clara)

3.5. Extracción de Azúcares por Hidrólisis Enzimática

Se realizó la prueba E1 para evaluar la eficacia de la **amiloglucosidasa**, replicando parámetros óptimos y alcanzando una concentración máxima de 45 g/L de azúcares.

El objetivo principal fue determinar que la enzima por sí sola agota el almidón en **120 minutos**. Esta información servirá como base para futuras pruebas, donde se buscará **reducir este tiempo** combinando la hidrólisis enzimática con otros métodos.

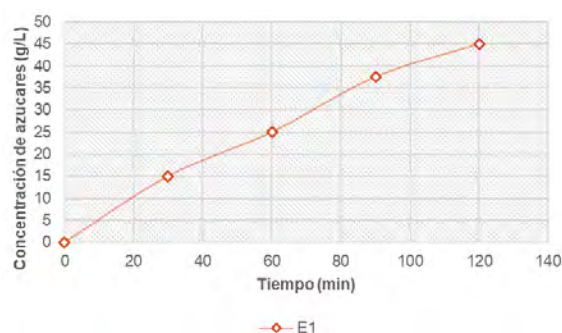


FIGURA 5. Eficiencia de la Extracción de Azúcares aplicando una hidrólisis enzimática por medio de la adición de amiloglucosidasa

3.6. Extracción de Azúcares aplicando combinación de Hidrólisis Ácida y Enzimática

Prueba Nivel Laboratorio

La prueba AEL1, realizada a escala de laboratorio (100 mL de solución de H_2SO_4 al 0.5% y 50 g de cebada residual), demostró un comportamiento favorable al aplicar los parámetros óptimos previamente definidos. A pesar de utilizar bagazo de cerveza clara, que generalmente tiene un menor contenido de azúcares, se logró una concentración máxima de 40 g/L de azúcares. Este resultado es prometedor para la revalorización de este tipo de residuo.

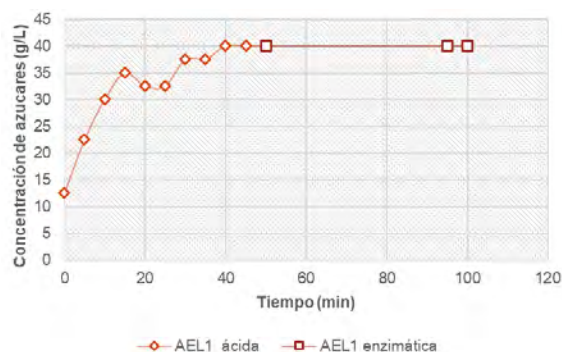


FIGURA 6. Eficiencia de la Extracción de Azúcares aplicando la combinación de hidrólisis ácida -enzimática a nivel laboratorio

Pruebas Planta Piloto

Se evaluó la hidrólisis combinada en bagazo de diferentes estilos de cerveza a nivel de planta piloto: **Imperial Stout (AEP1)**, **Doble IPA (AEP2)**, **Stout (AEP3)** y **Strong Bitter (AEP4)**.

La prueba AEP1 mostró el mayor incremento de azúcares (77.5 g/L), atribuido al mayor contenido de maltas en este estilo de cerveza. En contraste, la prueba AEP2, un estilo más ligero, presentó el menor incremento (52.5 g/L). Estos resultados confirman la viabilidad del proceso para revalorizar residuos de diversos estilos de cerveza, lo que llevó al inicio de una fase de reproducibilidad.

En la prueba AEP3, se extendió el tiempo de hidrólisis enzimática, logrando la hidrólisis completa del almidón (prueba de yodo negativa). Sin embargo, no hubo un incremento significativo de azúcares en la última media hora, alcanzando un máximo de 60 g/L.

Para la prueba AEP4, se redujo el tiempo de hidrólisis ácida, basándose en estudios que indican la degradación de azúcares y formación de furfurales después de 26 minutos (Fissha & Jabasingh, 2018). Tras la hidrólisis enzimática, se obtuvo una concentración de 62.5 g/L y el almidón se agotó por completo.

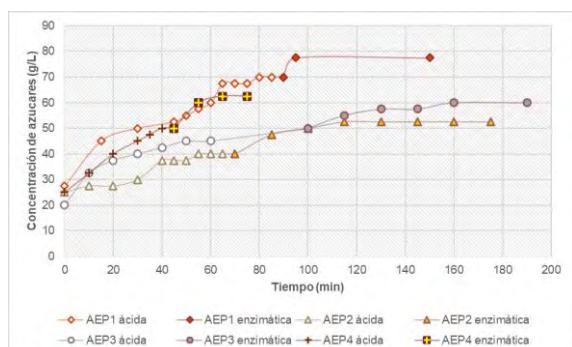


FIGURA 7. Comparación de la Extracción de Azúcares aplicando la combinación de hidrólisis ácida -enzimática en residuos de diferentes tipos de cervezas

3.7. Máxima extracción de azúcares

Al comparar los resultados obtenidos respecto a la concentración máxima de azúcares liberados en las distintas pruebas: hidrólisis ácida (ACO2: 100 g/L), la hidrólisis enzimática (E1: 45 g/L) y la combinación de ambas (hidrólisis ácida-enzimática, AEP1: 77.5 g/L). Los métodos más eficientes para la revalorización del bagazo cervecero resultan ser la hidrólisis ácida y la hidrólisis ácida-enzimática.

Aunque la prueba ACO2 presenta la mayor concentración de azúcares, es importante señalar que se realizó a nivel laboratorio, lo que implica condiciones más controladas y volúmenes reducidos. En contraste, la prueba AEP1 se llevó a cabo en planta piloto, acercándose más a condiciones reales de producción, lo que le otorga mayor aplicabilidad industrial. Ambas pruebas emplearon bagazo de cerveza tipo Imperial Stout, pero las recetas pueden variar entre lotes, afectando la cantidad y tipo de maltas utilizadas, y por ende la disponibilidad de azúcares fermentables en el residuo. Estos factores deben considerarse al evaluar la escalabilidad y eficiencia de los métodos, ya que no solo influyen las condiciones del proceso, sino también la variabilidad del insumo base.

3.8. Fermentación y destilación

En la Tabla 1 se muestran los resultados de fermentación de las pruebas AEP1, AEP2, AEP3 y AEP4, con los cuales se determinó que el máximo tiempo de fermentación es de 5 días, para el caso de residuos de cervezas pesadas como la Imperial Stout.

TABLA 1. Decremento de densidad por efecto de fermentación

Día/Prueba	Densidad			
	AEP1	AEP2	AEP3	AEP4
1	1.04	1.021	1.024	1.025
2	1.032	1.016	1.018	1.018
3	1.022	1.012	1.012	1.010
4	1.014	1.008	1.008	1.006
5	1.008	1.008	1.006	1.006
6	1.008	1.008	1.006	1.006

Una vez concluido el tiempo de fermentación, se montó el sistema para destilar que se muestra en la Figura 8.



FIGURA 8. Sistema de destilación de una etapa.

Finalmente, se obtuvo un mínimo de 40 mL y hasta un máximo de 140 mL de destilado a partir de 15 L de medio. Dichos destilados fueron almacenados en recipientes de vidrio tapados con Parafilm para evitar la evaporación del bioetanol como se muestra en la Figura 9.



FIGURA 9. Recipientes con destilados de las pruebas AEP1, AEP2, AEP3 y AEP4.



4. CONCLUSIONES

Al utilizar ambos métodos de hidrólisis se obtiene la máxima concentración de azúcares fermentables presentes en el bagazo de malta, agotando el almidón.

Aunque se realizó la combinación de enzimas, se concluyó que no es necesario llevarlo a cabo, cualquiera de las dos enzimas se puede utilizar de forma independiente.

Se determinó que el tiempo de fermentación es de 4 a 5 días, obteniendo un destilado de aproximadamente 50 a 70 mL, por cada 15 L de medio hidrolizado.

Al tener el proceso estandarizado para la revalorización de bagazo de malta, se busca aplicarlo a otro tipo de residuos ricos en almidón; los análisis se han comenzado a realizar en bagazo de maguey.

Se pretende complementar el estudio de fermentación con la implementación de dispositivos Tilt que registren cada cambio en la densidad del medio para determinar con mayor precisión el tiempo de fermentación y los cambios de temperatura que puedan presentarse.

El siguiente paso es la caracterización del proceso utilizando cromatografía de gases para la identificación de azúcares antes y después de la fermentación, así como los componentes del destilado.

257-263.

Recuperado

de

<https://www.redalyc.org/pdf/620/62030304.pdf>

REFERENCIAS

- [1]. Mussatto, S.I. (2014). Brewer's spent grain: A valuable feedstock for industrial applications. *J. Sci. Food Agric.* 94, 1264-1275. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24254316/>
- [2]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s.f.). Conociendo la industria de la cerveza. https://www.inegi.org.mx/tablerosestadisticos/industria_cerveza/
- [3]. Martínez Arvizu, R. G., & Naranjo Baños, J. (2023). Elaboración de pan con amaranto y bagazo obtenido a partir de cerveza artesanal tipo weizen (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. <https://ru.dgb.unam.mx/jspui/bitstream/20.500.14330/TES01000842347/3/0842347.pdf>
- [4]. Rojas Chamorro, J. A. (2019). Producción de bioetanol de segunda generación a partir de bagazo de cerveza [Tesis doctoral, Universidad de Jaén]. RUJA: Repositorio Institucional de Producción Científica. Recuperado de <https://ruja.ujaen.es/items/b47b4c98-a2bc-4e92-8c58-b817c437a444>
- [5]. Aguilera-Rivera, N., & Canizales-Leal, M. J. (2004). Cinética de la hidrólisis ácida de la cascarilla de cebada. *Revista mexicana de ingeniería química*, 3,





Hidrodesoxigenación de aceites del fruto de *elaeis guineensis* para la obtención de fracciones combustibles verdes.

FERNANDA VELÁZQUEZ RODRÍGUEZ^{1,*} IGNACIO ELIZALDE MARTINEZ^{1,*}

¹Centro Mexicano para la Producción más Limpia (CMP+L), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Av. Acueducto S/N, Ticomán, Gustavo A. Madero, C.P. 07340, Ciudad de México; México.

Autor de Correspondencia: Fernanda Velázquez Rodríguez (e-mail: fvelazquezr1401@alumno.ipn.mx);
Ignacio Elizalde Martínez (e-mail: ielizaldem@ipn.mx).

Este trabajo fue financiado parcialmente por la **Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional** Número de proyecto **20252380.**"

RESUMEN

Se realizó la hidrodesoxigenación de los aceites de palma y palmiste, ambos derivados del fruto *Elaeis Guineensis*, los cuales se muestrearon en una planta de extracción de aceite ubicada en el Sureste mexicano. Este proceso de hidrotratamiento se llevó a cabo en temperaturas de 350 a 380 °C, con tiempo de reacción de 3 horas, empleando una agitación de 800 rpm y manteniendo la presión de hidrógeno de 75 bar; se utilizó como catalizador las fases sulfuradas Níquel y Molibdeno, 4 g_{cat}:100 g de aceite. Los productos líquidos de reacción se separaron de la fase gaseosa a temperatura ambiente, y una vez retirado el catalizador, se caracterizaron por Resonancia Magnética Nuclear, Destilación simulada y Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier.

La conversión de triglicéridos fue similar partiendo del aceite de palma que si se alimenta aceite de palmiste (Conversiones: 90-98%); en ambos procesos se observó una baja concentración de intermediarios como ácidos grasos libres, los cuales disminuyen en concentración a medida que aumentan la temperatura y el tiempo de reacción.

La selectividad del proceso de hidrodesoxigenación fue hacia fracciones de tipo nafta, keroseno y diésel verdes cuando se utiliza aceite de palmiste como materia prima, mientras que, utilizando aceite de palma, se obtuvo mayor concentración de fracción tipo diésel verde, independientemente de la temperatura de reacción.

El impacto de este trabajo es mostrar una alternativa de aplicación del aceite de palma como biocombustible en México y, sobre todo, para el de palmiste, que no es totalmente aprovechado dentro de la cadena de valor del fruto *Elaeis Guineensis*.

PALABRAS CLAVE: Hidrotratamiento, Aceite de palma, Aceite de palmiste, Biocombustibles.

1. INTRODUCCION

Los combustibles convencionales que aportan más del 80% de la energía total a nivel mundial [1] están conformados por el petróleo, el carbón mineral y el gas natural. Sin embargo, estos combustibles también llamados fósiles representan un problema ambiental ya que al estar conformados mayormente por carbono y al utilizarse principalmente en procesos de combustión, dan como resultado la producción de dióxido de carbono, enriqueciendo la atmósfera con este gas, hasta 430 ppm en promedio al día de hoy. El CO₂ es un gas causante del efecto invernadero debido a que atrapa el calor de la Tierra, por lo que reducir las emisiones dióxido de carbono es una acción urgente [2].

El uso de combustibles fósiles trae consigo emisiones adicionales durante los procesos de extracción, refinación, transporte y distribución, además de la ya mencionada combustión, y otros problemas ambientales. Por ejemplo, los derrames de petróleo accidentales o malas prácticas operativas generan la contaminación de cuerpos de agua y suelo con consecuencias negativas a la salud humana y para el medio ambiente.

Dentro de las alternativas a las energías fósiles se encuentran los biocombustibles que, si bien tienen una base de carbono, al considerar su ciclo de vida completo, la reducción de emisiones de dióxido de carbono puede ser





hasta de 80% en comparación con los combustibles fósiles [3].

Los biocombustibles pueden ser tanto sólidos como la leña o el bagazo de caña; gaseosos como el biogás o biohidrógeno; o líquidos como el etanol, el biodiésel o el diésel verde [4]. Los biocombustibles sólidos al igual que el carbón mineral provocan emisiones contaminantes y residuales que limitan su aprovechamiento; los gaseosos tienen el inconveniente de su baja densidad energética mientras que los biocombustibles líquidos poseen alto contenido energético por unidad de volumen además de ser menos contaminantes que los sólidos [5] así como también son relativamente fáciles de confinar y por lo tanto de almacenar y transportar.

Dentro de los combustibles líquidos más estudiados está el diésel verde, cuyas características se asemejan a las del diésel fósil, pero con la diferencia que no poseen compuestos azufrados en sus moléculas, así como también no poseen compuestos poliaromáticos [6]. Estos últimos compuestos son los principales contaminantes del diésel fósil que buscan removerse durante la refinación del petróleo.

Para producir diésel verde existen diferentes tecnologías, dentro de las cuales el hidrotratamiento (HDT) ocupa uno de los principales lugares. Esta tecnología consiste en remover átomos distintos al carbono e hidrógeno de estructuras moleculares en presencia de hidrógeno en exceso y a altas presiones y temperaturas [7]. El hidrógeno además de ser un reactivo permite mantener la superficie del catalizador limpia removiendo el coque que se llegase a formar por efecto de las reacciones químicas. Además, el H_2 permite apagar las reacciones en reactores de lecho fijo en serie evitando el exceso de elevación de temperatura y ayuda a desarrollar patrones de flujo que se requieren para obtener las selectividades requeridas.

El hidrotratamiento es una tecnología que se ha utilizado durante ya varias décadas en la refinación del petróleo, por lo que se cuenta con experiencia en este proceso. Por lo anterior, se encuentra viable procesar materia prima por hidrotratamiento para obtener diésel verde [7]. Además del diésel verde otras fracciones como el keroseno verde y la nafta verde se pueden obtener durante las reacciones de hidrotratamiento, las cuales se denominan en este trabajo fracciones biocombustibles verdes.

Particularmente la biomasa que tiene mayor potencial para masificarse como materia prima para combustibles verdes son los aceites vegetales. Sin embargo, en nuestro país los aceites vegetales comestibles por normativa no se consideran para producir biocombustibles sino deben utilizarse aceites

de otros cultivos tales como la jatropha, higuierilla, o aceite de microalgas. El principal átomo diferente de carbono e hidrógeno en las estructuras de los aceites vegetales es el oxígeno y el proceso relativo a su remoción recibe el nombre de hidrodeshidrogenación (HDO), que se deriva del hidrotratamiento [8].

Aun cuando el tema alimenticio limita el uso de aceites vegetales comestibles en algunos casos los aceites tradicionalmente utilizados para consumo humano tienen ciertas desventajas [9]. Tal es el caso del aceite obtenido de la palma, el cual posee altos contenidos de compuestos saturados, y que si bien lo β -carotenos que posee en la materia prima representan un beneficio para las personas, al momento de refinar el aceite de palma se pierden estos compuestos valiosos. La palma aceitera no solo produce el aceite de palma (o derivado de la pulpa o mesocarpio), sino que también produce aceite de palmiste o del “kernel”, el cual se usa tanto en el sector alimenticio como en el sector cosmético [10].

En México el aceite de palma y de palmiste no se han estudiado para producir combustibles verdes del tipo diésel, keroseno y nafta por lo cual realizar investigación al respecto es un tema de interés científico con posibilidad de aplicarse a nivel industrial dado el nivel de producción de los insumos, así como la experiencia en hidrotratamiento [11, 12]. Por lo antes expuesto el objetivo del presente trabajo fue realizar la hidrodeshidrogenación de aceite de palma y de palmiste a las mismas condiciones de reacción para ambas materias primas para contar con información del comportamiento de dicha reacción de transformación de los aceites derivados de la palma en la producción de fracciones combustibles verdes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo la reacción de hidrodeshidrogenación de los aceites de palma y palmiste se utilizó un reactor de alta presión y temperatura de acero inoxidable marca Parr de 100 mL. El esquema del proceso de reacción se muestra en la Figura 1.

Previamente el catalizador de Níquel y Molibdeno soportado en alúmina se activó en un reactor también de alta presión y temperatura, pero de 600 mL; dicho reactor está dotado de una canastilla fija en la cual se deposita el catalizador. Se cuenta con deflectores para provocar la turbulencia del fluido de activación, el cual consta de gasóleo ligero de petróleo y dimetil disulfuro (Sigma Aldrich, >99%). La activación se lleva a cabo con una rampa de calentamiento desde temperatura ambiente hasta 350 °C, en donde se deja reaccionar por 3 h y con agitación de 750 rpm, y al término de



este tiempo se enfría el sistema de reacción para recuperar el catalizador activo.

El sistema de reacción consta de alimentación de gases nitrógeno e hidrógeno; el primer gas se utiliza para purgas y para verificar que no haya fugas antes de realizar la reacción, asegurando las operaciones. El segundo gas es el reactivo en exceso en la hidrogenación. El catalizador se añade al reactor antes de las pruebas de presión. El reactor se carga a lo más al 80% de líquido y se presuriza con el hidrógeno hasta el equilibrio antes de comenzar el calentamiento.

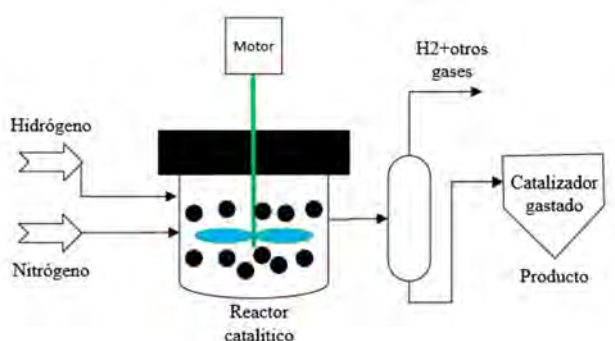


FIGURA 1. Esquema del proceso de hidrogenación del aceite de palma y palmiste.

Una vez alcanzadas las condiciones iniciales a temperatura ambiente se inició el calentamiento hasta el “set point”, para inmediatamente llevar la agitación a 800 rpm e iniciar la reacción. Las temperaturas a las cuales se realizaron las reacciones fueron 350, 360, 370 y 380 °C; el tiempo fue de 3 h y se utilizaron 4 g de catalizador activado por cada 100 g de aceite a tratar.

Al término de la reacción, se enfrió el sistema hasta temperatura de 35 °C aproximadamente y se desfogaron los incondensables. El producto líquido se recuperó filtrando el catalizador; se decantó para separar el agua y en su caso se secó el producto con sulfato de sodio.

La caracterización de los productos se realizó por destilación simulada (simdis) siguiendo el método ASTM D2887, así como también por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Resonancia Magnética Nuclear del Protón (H-RMN). Los equipos utilizados fueron: SIMDIS, CG-2010 plus Shimadzu. FTIR: Smiths Detection IlluminatIR II JY Modelo IR 2 acoplado a un microscopio óptico Olympus Bx41 con método de muestreo de Reflectancia Total Atenuada (ATR) con 36x de magnificación usando un cristal de diamante de 1 mm de diámetro. El intervalo de lectura fue de 400 a 4000 cm^{-1} con una resolución

de 4 cm^{-1} y 32 escaneos por cada lectura. H-RMN: Bruker Avance III 750 MHz (Bruker Biospin, Rheinstetten, Alemania) equipado con una sonda de banda ancha de 5 mm, espectros en el intervalo de desplazamiento químico (δ) de 0 a 16 ppm.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado de la caracterización por H-RMN se tiene que para el aceite de palma la mayor concentración de moléculas son de tipo ácidos grasos saturados, los cuales constituyen cerca del 60%, mientras que el restante 40% está formado por ácidos grasos insaturados. En el caso del aceite de palmiste el 86% son saturados, lo cual concuerda bien con las características físicas de esta materia prima, que es sólida a temperatura ambiente. Este último tipo de aceite posee una alta proporción ácido dodecanoico, por lo cual las fracciones derivadas del hidrotratamiento se esperan en este intervalo de átomos de carbono.

Los espectros de FTIR para las cargas de alimentación se muestran en la Figura 2.

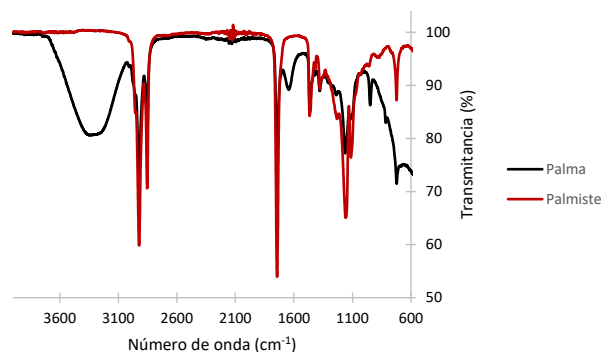


FIGURA 2. Espectros de IR la palma y palmiste utilizados como carga de alimentación al reactor de hidrogenación.

Se observan señales características de C=O y C-O en alrededor de 1743 y 1160 cm^{-1} , respectivamente para ambos aceites obtenidos de palma y palmiste. Adicionalmente para el aceite del mesocarpio, se observan señales del agua en 3350 y 1645 cm^{-1} , debido al proceso de extracción de este aceite en la planta industrial. Este contenido de agua puede influir en el desempeño del reactor ya que puede desactivar el catalizador, por lo que el aceite en cuestión se sometió a secado, y al caracterizar de nuevo por FTIR ya no se observó la presencia del agua. Para el caso del aceite del palmiste, éste no presenta

las señales de agua, por lo cual se puede utilizar directamente como carga de alimentación.

En la Figura 3 se muestran los espectros de FTIR para productos de reacción obtenidos a temperatura de reacción de 370 °C para aceite de palma y palmiste. Las bandas a 1743 cm^{-1} prácticamente desaparecen (97.7 y 98.7% de T) durante el hidrotratamiento lo cual representa una conversión prácticamente completa del grupo carbonilo de los aceites. A 1160 cm^{-1} la banda debida al C-O prácticamente desaparece en el aceite de palmiste, no así en el aceite de palma. Sin embargo, en el aceite de palma debido a la presencia de mayor contenido de agua, las bandas no tuvieron buena resolución, por lo cual, al igual que en la carga de alimentación, los productos de hidrodesoxigenación del aceite de palma se secaron y de nuevo se caracterizaron por FTIR mostrando finalmente un comportamiento similar a los espectros del producto hidrotratado del palmiste.

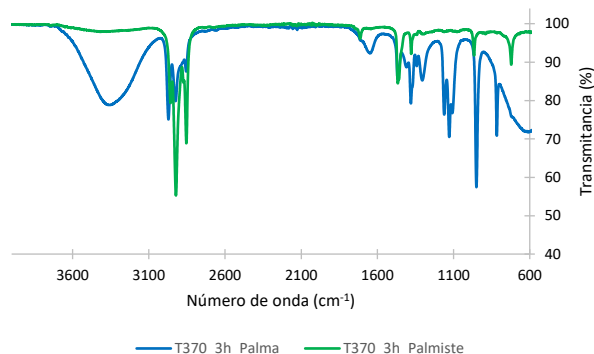


FIGURA 3. Espectros IR de productos de hidrotratamiento de palma y palmiste obtenidos a 370 °C, 3 h, 800 rpm con 4% peso de catalizador.

En general, se observó que las señales del FTIR de los productos tanto de palma como palmiste debidas al grupo C=O fueron menos intensas a medida que se incrementó la severidad de las reacciones (es decir mayor temperatura), mientras que la señal debida al enlace C-O prácticamente desapareció para todos los productos de reacción, lo que significa que en los productos hidrotratados hay compuestos oxigenados en muy baja concentración [13, 14].

Las curvas de destilación para productos de reacción del aceite de palma y palmiste obtenidos a 370 °C se muestran en la Figura 4. Se incluyen en la misma figura las curvas de destilación de nafta y diésel fósil así como hexadecano grado reactivo como referencia. Claramente se puede apreciar que los compuestos contenidos en el producto del aceite de palma

ebullen a mayor temperatura que el correspondiente al aceite de palmiste, esto es porque a una temperatura dada, por ejemplo 200 °C el porcentaje recuperado del producto del aceite de palma es menos del 5%, mientras que para el producto obtenido del aceite de palmiste el porcentaje recuperado a la misma temperatura es más del 20%.

La tendencia anterior se mantuvo para el resto de los productos, es decir, en cada temperatura de operación, los productos derivados del aceite de palmiste presentaron mayor porcentaje de ligeros en comparación con los productos de reacción del aceite de palma. Esto último significa que mientras que la hidrodesoxigenación del aceite de palma permite obtener principalmente diésel verde y residuales, los productos de HDT de aceite de palmiste dan una mayor distribución de fracciones, entre ellas nafta, keroseno y diésel verde.

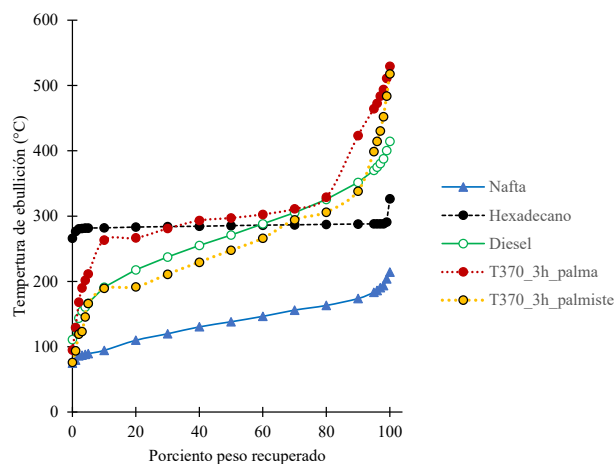


FIGURA 4. Curvas de destilación de los productos de reacción de palma y palmiste obtenidos a 370 °C y 3 h. Por comparación se incluyen las curvas de destilación de nafta y diésel de petróleo, así como hexadecano.

Otra consecuencia que se observó como producto de las reacciones químicas es que a medida que la temperatura de reacción se incrementó, también la concentración de fracciones ligeras (keroseno y nafta) creció aun utilizando como materia prima el aceite de palma. Lo anterior se atribuye a la hidrodesintegración que ocurre de los hidrocarburos de alto peso molecular obtenidos del HDT [9].

En general, se observa que, aunque las condiciones de reacción son las mismas y los aceites alimentados al reactor son derivados de la misma planta aceitera, los productos de reacción dan diferentes rendimientos hacia fracciones nafta, keroseno y diésel, así como también producen diferentes



cantidades de residuales, siendo esta última fracción mayor para el caso de productos derivados del aceite de palma que los obtenidos a partir del aceite de palmiste. Por lo anterior, seleccionar la carga de alimentación para mejorar la selectividad de los productos es crucial durante la obtención e fracciones combustibles verdes.

Finalmente se pudo constatar que los aceites de palma y palmiste pueden producir combustibles verdes lo cual resulta prometedor para el tema de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, además de limitar las emisiones de dióxido de carbono al ambiente al emplear materias primas de origen renovable. Sin embargo, aún persisten retos que deben resolverse para poder implementar la hidrodeseoxigenación de aceites derivados de la palma, lo cual debe abordarse en futuras investigaciones.

4. CONCLUSIONES

Se realizó la hidrodeseoxigenación del aceite de palma y palmiste a 350-380 °C, 750 rpm y 3 h usando un catalizador activado de NiMo soportado. Los productos de reacción mostraron mayor calidad en términos de menor contenido de oxígeno a medida que la temperatura fue mayor. En el caso de los productos de palmiste, se obtuvieron mayores selectividades hacia nafta y keroseno que para productos del aceite de palma, siendo el producto con mayor relevancia el diésel verde cuando se usó aceite de palma como materia prima. En los productos de ambos aceites se observó mayor cantidad de ligeros a medida que la temperatura aumentó lo cual es producto del rompimiento de moléculas obtenidas en la etapa de hidrotratamiento. Por lo que seleccionar adecuadamente el tipo de materia prima o aceite junto con las condiciones de reacción puede conducir hacia la optimización de los procesos, lo cual se recomienda realizar como trabajo futuro.

AGRADECIMIENTOS

La autora Fernanda Velázquez agradece al Programa de Formación de Investigadores del IPN por la beca otorgada para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

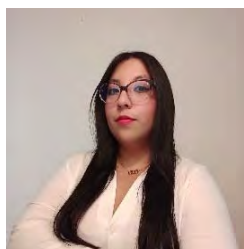
- [1]. Energy Institute, *Statistical Review of World Energy*. Author. Disponible en: <https://www.energyinst.org/statistical-review>.
- [2]. NASA, *Dióxido de carbono*. The National Aeronautics and Space Administration (2025). Disponible en: <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>.
- [3]. M. Mofijur, M.G. Rasul, J. Hyde, A.K. Azad, R. Mamat, and M.M.K. Bhuiya, *Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction*. *Ren Sust Energy Rev*, 53: 265-278 (2016). 10.1016/j.rser.2015.08.046
- [4]. E. Salinas and V. Gasca, *Los biocombustibles*, *El Cotidiano*, 57: 75-82 (2009). Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009>
- [5]. N. Savage, *Fuel options: The ideal biofuel*. *Nature*, 474: S9-S11 (2011). 10.1038/474S09a
- [6]. Gad, S.C. *Diesel Fuels*. In *Encyclopedia of Toxicology*, Philip Wexer (Edit). Third Edition (2014). Elsevier. ISBN-13: 978-0-12-386455-0
- [7]. E. Volonterio, J. Bussi, J. Castiglioni, I. Vieitez, I. Jachmanián, *Hidrotratamiento catalítico de aceites vegetales para la producción de biocombustibles líquidos*, *INNOTEC*, 14: 37-43 (2017). 10.26461/14.01
- [8]. R. Balam-Chan and I. Elizalde, *Algunos aspectos de producción de diésel verde a partir de materias primas de segunda generación y la tecnología del hidrotratamiento*. *Rev Int Inv Innov Tecnol*, 6(31): 1-15 (2018). Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/riit/v6n31/2007-9753-riit-6-31-00005.pdf>
- [9]. E. Hernández, I. Elizalde, F. Sánchez, C. Reza, R. Ramírez, C. Monterrubio, *Oxygen removal from poor-quality refined edible oil to produce hydrocarbon-type biofuels using the hydrotreating process*. *Reac Kinet Mech Cat*, 138: 1469–1477 (2025). 10.1007/s11144-025-02820-4
- [10]. V. Gibon, *Palm oil and palm kernel oil refining and fractionation technology*. In: Lai O-M, Tan C-P, Akoh CC (eds) *Palm oil*. AOCS Press, Champaign, pp 329–375 (2012). 10.1016/B978-0-9818936-9-3.50015-0
- [11]. A. Figueroa, *Recuperación económica del sector primario en el sureste mexicano tras la pandemia*. *P de palma una revista del sector para el sector*. 1: 7-8 (2022). Disponible en: <https://femexpalma.com.mx/revista-p-de-palma/>
- [12]. A. Solís, *Pemex refina más de un millón de barriles diarios tras cinco años de retraso en alcanzar objetivo*. *Bloomberg Línea*, 21 de mayo (2024). Disponible en: <https://www.bloomberglinea.com/latinoamerica/mexico/pemex-refina-mas-de-un-millon-de-barriles->





diarios-tras-cinco-anos-de-retraso-en-alcanzar-
objetivo/

- [13]. O. Sánchez, F. Mederos, I. Elizalde, F. Sánchez, F. Trejo, *Producing hybrid fuels by hydrotreating Jatropha curcas L. and gasoil mixtures in a batch reactor*. J Taiwan Inst Chem Engs, 128: 140-147. 10.1016/j.jtice.2021.08.046
- [14]. M. García, *Desarrollo de un proceso basado en catálisis heterogénea para producir fracciones biocombustibles líquidas a partir de aceite vegetal*. Tesis de Maestría IPN. 2024.



Fernanda Velázquez Rodríguez es estudiante de Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia en el Instituto Politécnico Nacional; de nacionalidad mexicana radicada en México. Cursó sus estudios de licenciatura en la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas de donde es egresada. Velázquez Rodríguez se dedica a la investigación en el área de biocombustibles mediante catálisis

heterogénea y tratamiento de aguas residuales para remover contaminantes emergentes con materiales sólidos. También cuenta con experiencia industrial en áreas afines a su carrera.

Fernanda Velázquez posee un Capítulo de libro edición nacional, una publicación en revista de divulgación nacional y una publicación en una revista JCR. También ha participado en foros y congresos a nivel institucional y nacional.





Sistemas biofotocatalíticos para la generación de hidrógeno empleando un consorcio nativo de microalgas

*M. G. ESQUIPULA ESPINOSA¹, *S. M. GARCÍA SOLARES^{1,2}, A. M. RODRÍGUEZ MALDONADO³*

¹ Centro Mexicano Para la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto S/N, Ticomán, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, 07340, México.

² Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles (LaNDACBio), Ciudad de México 07340, México.

³ Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad, Instituto Politécnico Nacional, Av. Wilfrido Massieu, Adolfo López Mateos S/N, Nueva Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero, 07738 Ciudad de México

Autora de correspondencia: S. M. García Solares (e-mail: sgarcias@ipn.mx)

Las autoras agradecen a los proyectos SIP: 20241116 y 20254500 del Instituto Politécnico Nacional. La autora María Guadalupe Esquipula Espinosa agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI) por la beca de maestría otorgada. La autora Azzul María Rodríguez Maldonado agradece al Instituto Politécnico Nacional por la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI)

RESUMEN

La descarga de agua residual en cuerpos de agua sin el previo tratamiento provoca desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos. De acuerdo con el Programa Nacional Hídrico 2022-2024, las cuencas del Valle de México son de las más contaminadas. Por ende, es importante conocer la calidad del agua y si ésta es apta para su potabilización y consumo, por ello CONAGUA cuenta con Indicadores de Calidad, como: pH, DQO, metales pesados, alcalinidad, dureza total. Sin embargo, poco sirve contar con éstos si la disponibilidad de agua dulce cada vez es menor. Los

tratamientos convencionales de aguas residuales presentan desventajas, algunas de ellas son eficiencia de remoción de contaminantes bajas, altos costos, y gran cantidad de energía consumida. Por ello, una de las alternativas para la remoción de diversos contaminantes es el uso de sistemas

bioelectroquímicos, las cuales consisten en tratar el agua residual con ayuda de microorganismos exoelectrogénicos. Recientemente se han probado microalgas en estos sistemas ya que no solo son capaces de remover contaminantes, si no que pueden generar otros bioproductos de valor agregado, como: lípidos, proteínas y azúcares.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la capacidad que tiene un consorcio nativo de microalgas para ser utilizados en un sistema bioelectroquímico, que remueva contaminantes de la cuenca (Presa Becerra, El Pirú, Álvaro Obregón, Ciudad de México) y simultáneamente produzca hidrógeno. Para cumplir con este objetivo, ya que el proyecto está en etapa inicial, se divide en tres fases: i) Diseño y construcción del sistema bioelectroquímico, ii) Evaluación del consorcio en el sistema electroquímico en condiciones simuladas, iii) Evaluación del consorcio en el sistema bioelectroquímico en agua de la cuenca.

Los resultados esperados: disminución de DQO como un indicador de la calidad del agua, generación de bioproductos de valor agregado y producción de H₂.

PALABRAS CLAVE:

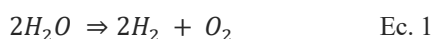
Consorcio de microalgas, producción de hidrógeno, sistemas electroquímico, tratamiento de agua residual.





1. INTRODUCCIÓN

El hidrógeno se dice ser energía limpia, debido a que su combustión o uso en celda de combustible produce solamente vapor de agua, evitando las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. El hidrógeno puede producirse a partir de diversos métodos químicos los cuales en su mayoría hacen uso de altas temperaturas y energía, además que emiten CO₂. Por ejemplo, la electrólisis (ecuación 1) se basa en la aplicación de una corriente eléctrica para separar la molécula del agua (H₂O) en oxígeno (O) e hidrógeno (H₂). A pesar de su eficiencia, el elevado uso de energía limita su viabilidad económica y ambiental a menos que se combine con fuentes de energía renovable [2]. Por otro lado, se está desarrollando e investigando la producción de hidrógeno a partir de fuentes de energías renovables [3][4]. Se busca cumplir con el séptimo Objetivo de Desarrollo Sostenible el cual es Energía asequible y limpia, se contribuye con las metas: 7.2 la cual es aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas, pues con este proyecto se promueve la transición hacia las fuentes renovables, 7.4 Investigación e innovación en energías limpias. [5].



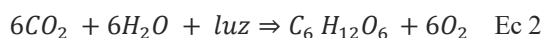
Algunos de los métodos más recientes de producción de hidrógeno amigables con el medio ambiente, y una excelente alternativa es aquella a partir de microalgas, dado que existen varias especies de éstas que participan en la producción de hidrógeno bajo condiciones específicas, por ejemplo, las celdas de combustible biológicas producen H₂ por medio de la conversión de energía química contenida en sustratos orgánicos presentes en el agua residual mediante la actividad de los microorganismos [3]. Este sistema está compuesto por una cámara anódica (agua residual y consorcio microalgal) y una cámara catódica (abiótico) las cuales se encuentran separadas por una membrana (intercambio protónico). Estos sistemas utilizan biopelículas electroactivas para acelerar la oxidación de materia orgánica, produciendo protones y electrones en el ánodo, los cuales viajan a través de la solución del reactor y el circuito externo, para llegar al cátodo, donde se combina para formar hidrógeno [2]. Se usa agua residual como sustrato puesto que ésta es rica en nitrógeno, fósforo y

materia orgánica, las cuales son usadas por el consorcio microalgal como fuente principal de energía.

Aproximadamente el 80% de los cuerpos de agua se encuentran contaminados, la mayoría de las empresas, hogares, hospitales y escuelas vierten sus aguas residuales sin tratar directamente en los ríos, océanos, lagos o al sistema de drenaje municipal. Por ende, el sistema de celdas de combustible biológicas es una excelente alternativa, pues la combinación con el consorcio microalgal no solo se limitan a la eliminación de materia orgánica presente en el agua residual, también es capaz de eliminar una gran variedad de contaminantes emergentes generados por actividades antropogénicas [6].

Con esto se pretende cumplir con el sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible el cual es Agua limpia y saneamiento; las metas que se pretenden ejecutar con este proyector son las metas: 6.3 mejorar la calidad de agua reduciendo la contaminación, eliminando los vertidos de productos químicos y materiales peligrosos, 6.6 proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua [5].

El uso de microalgas en estos sistemas ha tomado importancia debido a la capacidad de adaptarse a condiciones ambientales variadas, por ejemplo; crecer, asimilar y resistir las condiciones tóxicas de las aguas residuales [6]. La mayoría de ellas no requieren de un medio de cultivo complejo para desarrollarse, pueden hacerlo en ambientes pobres en nutrientes con fuentes básicas como son el fósforo, dióxido de carbono, hierro y agua, dado que estos microorganismos son autótrofos, lo que quiere decir que producen su propio alimento a través de la fotosíntesis, en la cual usan el dióxido de carbono (CO₂) del aire, la energía solar y el agua para producir glucosa (C₆H₁₂O₆) y oxígeno (ecuación 2); estos compuestos son de utilidad en las celdas de combustibles biológicas como sustrato para generar electricidad. Pues los microorganismos exoelectrogénicos oxidan los compuestos orgánicos presentes en la biomasa microalgal para liberar electrones.





En las celda de combustible biológicas las microalgas son capaces de transferir electrones directamente a un electrodo, esto se facilita a través de la formación de la biopelícula microalgal, por ello, se estudia la posibilidad de sustituir un aceptor de electrones convencional por microalgas [7].

En la cámara anódica se producen protones y electrones, los e^- se transportan al cátodo mediante un conductor del circuito externo. El uso de microalgas en el cátodo proporciona oxígeno el cual funciona como aceptor de electrones, lo que es esencial para el funcionamiento de la celda. [8]

Las microalgas capturan el dióxido de carbono y la luz solar para generar compuestos orgánicos, parte del carbono fijado se canaliza hacia la síntesis de lípidos. Y en la conversión metabólica el CO_2 se transforma en ácidos grasos a través de las rutas como la acetil-CoA carboxilasa y la síntesis de triglicéridos [9]. Esta es otra de las ventajas de trabajar con microalgas, con estos compuestos orgánicos y dependiendo de las propiedades que se le apliquen al sistema podremos obtener una biomasa de la cual se pueda adquirir diferentes productos de valor agregado. Por ejemplo, un medio de cultivo con limitantes nutricionales (como el fósforo y nitrógeno) pueden generar una biomasa rica en lípidos y ésta es ideal para la elaboración de biocombustibles como biodiésel. Por otro lado, de la biomasa microalgal también se obtiene biofertilizantes, cosméticos, colorantes, biocombustibles (bioetanol y biogás), nutraceuticos, suplementos alimentos y recientes estudios han demostrado que de ésta se podría extraer polihidroxialcanoatos (PHA) y con ellos fabricar bioplásticos [10] a demás que Xu. P et al 2023 en sus artículos menciona que las microalgas pueden inducir la precipitación de carbonato y con ésto producir biocemento [9]

Con este proyecto se pretende incorporar el agua residual a la economía circular, puesto que, esta contiene materia orgánica y algunos elementos esenciales como son el nitrógeno y fósforo los cuales son importantes para el crecimiento de las microalgas, por ende, éstas dejarían de ser consideradas un residuo para convertirse en la materia prima del sistema. Con esto el agua podría reintegrarse a varios procesos relacionados a los sectores agrícolas, industriales, ganaderos e incluso recreativos como son los estanques de parques y en áreas

verdes, pues aún no hay estudios suficientes para garantizar el consumo humano.

2. METODOLOGÍA

2.1. Recolección y caracterización del agua en la cuenca de la Presa Becerra

Se recolectará la muestra del agua en la cuenca de la Presa Becerra ubicada en El Pirú, Álvaro Obregón, Ciudad de México; de acuerdo con la NMX-AA-003-1980. Donde especifica que ésta debe ser tomada en el centro del cuerpo del agua, antes el recipiente se deberá enjuagar repetidamente con el agua de la cuenca, se introducirá en ella completamente y se extraerá la muestra la cual debe ser conservada a $4^{\circ}C$ y su almacenaje no debe ser mayor a tres días.

Para la caracterización del agua residual se realizará a través de análisis físicos y químicos los cuales están especificados en la NOM-001-SEMARNAT-2021 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los metales pesados se analizarán mediante el método EPA 200.8: Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry.

2.2. Diseño de la celda de combustible biológica

Estará conformada por tres partes; la cámara anódica, la cámara catódica y una membrana la cual separa el ánodo del cátodo. El material de la membrana será de Nafion, el cátodo será de grafito, el ánodo una mezcla de Rutenio y carbón activado, con una resistencia de 100Ω , distancia entre electrodos de 10 cm, cada electrodo tendrá una superficie de 10.5 cm^2 volumen total de 1000 mL en cada compartimento, el material de la celda será vidrio, el conductor del circuito externo será de cobre [8] [9] [11]. Se usará un difusor de aire para controlar la concentración del oxígeno disuelto, este deberá ser de PTFE, en forma de disco, con un diámetro de 5 cm, espesor del material de 3 mm, tamaño de poro $1 \mu\text{m}$.





2.2. Desempeño de las microalgas en la celdas de combustible

El sistema se debe adecuar a las condiciones necesarias para el crecimiento de las microalgas, parámetros como son: temperatura de 25°C, intensidad lumínica de 3500lx, pH de 9, una aireación fina para evitar la dañar la biopelícula microalgal de 40 burbujas por minuto (BPM).

Evaluar la generación de biomasa de las microalgas vinculadas a su desempeño en la celda de combustible biológica [12].

Para evaluar el crecimiento de las microalgas se usará el modelo Monod (ecuación 3).

$$\mu = \mu_{max} * \frac{[S]}{K_s + [S]} \quad \text{Ec. 3}$$

2.3. Desempeño de la remoción de los contaminantes presentes en el agua

Para estudiar el proceso de remoción de los contaminantes se realizará a través de análisis físicos y químicos los cuales están especificados en la NOM-001-SEMARNAT-2021 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. [13]

Lo metales pesados de realizarán por medio de la Norma EPA 200.8: Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. Se medirán parámetros tales como pH, conductividad esto por medio de un potenciómetro. La determinación de nitrógeno y fósforo se realizará a través de la espectrofotometría [14]

2.4. Identificar y cuantificar la cantidad de hidrógeno producido, por medio de la técnica de cromatografía.

Mediante cromatografía de gases con detector de conductividad térmica (GC-TCD) se realizará la medición del hidrógeno.

3. RESULTADO

Se espera que el consorcio microalgal se adapte a la celda de combustible biológica y que sea capaz de crecer en el medio de agua residual, formando biomasa para la generación de bioproductos de valor agregado, generar oxígeno el cual será de utilidad para la producción de hidrógeno con la mínima cantidad de emisiones de dióxido de carbono. Reducción de metales pesados, nitrógeno y fósforo; la biorremediación de las aguas residuales, el indicador de la calidad del agua será la disminución de la DQO. Contribuir a la transición energética mediante hidrógeno sostenible.

4. CONCLUSIÓN

El presente trabajo propone una solución innovadora y sostenible para dos de los problemas que afectan en la actualidad: la contaminación con productos provenientes de la actividad humana de los cuerpos de agua y la demanda de combustibles fósiles; mediante las celda de combustible biológicas, esto acoplado a un consorcio microalgal, este sistema a demás de generar hidrógeno y biorremediar las aguas residuales las cuales puedan ser reutilizadas en actividades agrícolas, industriales y/o recreativas. También produce biomasa, de la cual se pueden adquirir diversos productos con valor agregado como biocombustibles (biodiésel, bioetanol), biofertilizantes, alimentos, nutraceuticos.

5.REFERENCIAS

- [1]. Mousa, S., & Ali Mohsin, M. E. (2025). Bioprocess modeling of microalgae in treating domestic wastewater via fermentation to convert pollutants into hydrogen. *Journal of Molecular Structure*, 1345. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.143022>
- [2]. Zerveas, S., Mountourakis, F., Psychikos, A., Papazi, A., & Kotzabasis, K. (2025). An innovative approach to microalgal biocatalysis for enhanced electrolytic hydrogen production — Advancing green hydrogen solutions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 103, 659–665. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.242>





- [3]. Obileke, K. C., Onyeaka, H., Meyer, E. L., & Nwokolo, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. In *Electrochemistry Communications* (Vol. 125). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>
- [4]. Raychaudhuri, A., & Behera, M. (2023). Biodegradation and power production kinetics in microbial fuel cell during rice mill wastewater treatment. *Fuel*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126904>
- [5] **Organización de las Naciones Unidas (ONU).** (s. f.). *Energía asequible y no contaminante*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [6]. Al-Jabri, H., Das, P., Khan, S., Thaher, M., & Abdulquadir, M. (2021). Treatment of wastewaters by microalgae and the potential applications of the produced biomass—a review. In *Water (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w13010027>
- [7] Jiang, S., Liu, H., Zhang, W., & Lu, Y. (2024). Bioanode boosts efficacy of chlorobenzenes-powered microbial fuel cell: Performance, kinetics, and mechanism. *Bioresource Technology*, 405. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130936>
- [8] Sharma, M., Salama, E. S., Zhang, P., Zhang, L., Xing, X., Yue, J., Song, Z., Nan, L., Yujun, S., & Li, X. (2022). Microalgae-assisted microbial fuel cells for electricity generation coupled with wastewater treatment: Biotechnological perspective. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 49). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102966>
- [9] Xu, P., Li, J., Qian, J., Wang, B., Liu, J., Xu, R., Chen, P., & Zhou, W. (2023). Recent advances in CO₂ fixation by microalgae and its potential contribution to carbon neutrality. In *Chemosphere* (Vol. 319). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137987>
- [10] Kannan, N., & Donnellan, P. (2021). Algae-assisted microbial fuel cells: A practical overview. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100747. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100747>
- [11] Khandaker, S., Das, S., Hossain, M. T., Islam, A., Miah, M. R., & Awual, M. R. (2021). Sustainable approach for wastewater treatment using microbial fuel cells and green energy generation – A comprehensive review. In *Journal of Molecular Liquids* (Vol. 344). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117795>
- [12] Cinar, O. S., Chong, Z. K., Kucuker, M. A., Wiecezorek, N., Cengiz, U., & Kuchta, K. (2020). Bioplastic production from microalgae: a review. *Ánt. J. Environ. Res. Public Health*, 17(11), 3842.
- [13] Razzak, S. A., Lucky, R. A., Hossain, M. M., & deLasa, H. (2022). Valorization of Microalgae Biomass to Biofuel Production: A review. In *Energy Nexus* (Vol. 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100139>
- [14] Raychaudhuri, A., & Behera, M. (2023). Biodegradation and power production kinetics in microbial fuel cell during rice mill wastewater treatment. *Fuel*, 339. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126904>
- [15] Arun, S., Sinharoy, A., Pakshirajan, K., & Lens, P. N. L. (2020). Algae based microbial fuel cells for wastewater treatment and recovery of value-added products. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 132). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110041>





Fe₂O₃-FeOOH NPs to transform CO₂ into organic compounds with H₂O₂ and solar radiation

A. HUICOCHEA-VÁZQUEZ¹, I. LUNA-OCAMPO¹, M. BARRAGÁN-TRINIDAD¹, C. ROSILES-PÉREZ¹, J. MUÑOZ-SORIA¹, O. CASTRO-OCAMPO¹, A. E. JIMÉNEZ-GONZÁLEZ¹, V. GARIBAY-FEBLES², L. GONZÁLEZ-REYES², I. HERNÁNDEZ-PÉREZ², R. SUÁREZ-PARRA^{1*}

¹Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Temixco, Morelos, 62580, México

²Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152 Col. San Bartolo Atepehuacan, CDMX, C.P 07730, México

³Departamento de Ciencias Básicas e Ingen, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo Xalpa 420 Col. Nueva el Rosario, 02128, Ciudad de México, México.

Corresponding author: R. Suarez Parra (e-mail: rsp@ier.unam.mx)

“This work was supported by Conahcyt under Grant CF-2023-I-698”

ABSTRACT Carbon dioxide belongs to the group of the main compounds that generates the climatic change due to its greenhouse effect and it worries all the population in the world, even though its concentration is not too high compared with others like water vapor. For this reason, the scientific community some decades ago started to look for a sustainable process to transform the CO₂ into high-added-value substances like methanol, ethanol or other organic compounds. Indeed, the molecular carbon dioxide structure with double σ and π chemical bonds between carbon atom and two oxygen atoms makes the molecule chemically too stable. However, the same molecular structure of the carbon dioxide compound suggests a possible way of reaction because it is a molecule surrounded for an electronic cloud and this condition lures cations or radicals that can be added. So, until this moment the thermodynamic stability of the carbon dioxide molecule is the main problem to convert it into organic compounds. In this work we used the photocatalytic method considering the results published on Sustainable Advanced Oxidation Processes to degrade different recalcitrant pollutants like azo-dyes, pesticides or phenol derivatives. Using a mixture of iron oxides-iron oxohydroxides at pH 2.5-3 with hydrogen peroxide and visible radiation, the carbon dioxide was converted into high-added-value methanol, ethanol and oxalic acid.

INDEX TERMS Iron oxide nanoparticles, Visible radiation, Ethanol, Methanol, Carbon dioxide.

1. INTRODUCTION

Even though still there are some countries, which presidents refuse the influence of the pollutant gases like carbon dioxide, methane or nitrogen oxides, among others, in the climate change, it is obvious that the yearlong great emissions of these pollutants are modifying the life in our planet. Some countries are devastated by the droughts disrupting the sowing work or devastating the crops for huge floods. For this reason, it is important to develop a process to transform one of the substances that threatens, with others, the actual civilization into high-added-value organic compounds. This substance is the carbon dioxide. Certainly, the thermodynamic stability of the carbon dioxide molecule lies in its structure: the carbon atom has two double σ and π bonds with two oxygen atoms forming a lineal molecule and giving it a high chemical stability. Indeed, the transformation of the carbon dioxide molecule into carbon monoxide or into organic compounds requires a very high energy, for example a mixture of carbon dioxide with water has been transformed into kerosene in a solar tower using a solar reactor of 50 kW and using as catalyst the ceria material (CeO₂) [1], or the syngas formation using the same mixture of carbon dioxide





and water captured from the air. This process considers the simultaneous splitting of both molecules via a solar thermochemical redox cycle [2]. In the literature, the electrochemical methods with different electrodes dominate the studies on the transformation of the carbon dioxide molecule into high-added-value organic compounds, for example some authors denotes that the CO₂ contribution to global warming is near to 0.2% , however they propose a new benchmark catalysts for the CO₂ electroreduction gibing examples of metal-based and nanostructured electrocatalysts [3]; The electrochemical preparation of ethylene reducing the CO₂ molecule is proposed on the copper-based catalysts and discussing the catalyst design strategies for ethylene production performance [4]; Other investigators discuss on the catalyst discovery in academia and scale-up factors for translation to industry for the electrochemical CO₂ conversion [5]. By other authors also has been denoted that the influence of the electric double layer in the CO₂ transformation is still not well understood on the reaction mechanisms and using the classical density functional theory can predict the electrolyte effects on coproduction and C2 formation on Ag and Cu electrodes [6]. There are authors that consider there is first the formation of carbonates (CO₃²⁻), from CO₂, as an electrochemically inert intermediates on a copper electrode and then transformed into formate [7]. The formation of ethanol and formate is also reported in a photoelectrochemical reactor using a BiVO₄/FeOOH/NiOOH photoanode and a GDE/Cu₂WO₄ photocathode [8]. The CO₂ methanation is another course for reusing this greenhouse gas and produce methane on niobium-cerium oxid, which were supported on nickel catalyst [9]. The formation of multicarbon products (C₂₊) is also proposed using the electrochemical reduction reaction (eCO₂RR) with renewable electricity and including tandem catalysts [10]. On the basis of rigorous microkinetic analysis were determined the factors that can influence the performance of Cu-based electroreduction of the CO₂ molecules [11].

Results of the present work depict the carbon dioxide conversion into high-added-value compounds like methanol and ethanol. In order to attain this goal, the carbon dioxide molecule is considered rich in electrons that can lure and then react with radicals like hydroxyl species (•OH), similar to those reactions of advanced oxidation processes where rich electron molecules are oxidized [12]. This way, the hydroxyl radicals are added to the carbon dioxide molecule till transform it, into methanol and ethanol [13]. It has to be denoted that in this case sodium bicarbonate salt was used as the source of carbon dioxide molecules.

2. METHODS AND MATERIALS

The ferrous sulfate (FeSO₄) salt was obtained from Fermont. The Sulfuric acid (H₂SO₄), the Sodium bicarbonate (NaHCO₃) and the Hydrogen peroxide were purchased from Merck. Deionized water was obtained from a Milli-Q system (18 MΩ) to prepare the solutions.

The mixture of iron oxides-iron oxohydroxides (Fe₂O₃-FeOOH) nanocatalyst was prepared in a photoreactor using 50 ml of FeSO₄ solution with a concentration C=1 x 10⁻³ M and diluted in 150 deionized water. The pH 2.5-3 of the ferrous sulfate solution was adjusted using diluted sulfuric acid. The ferrous sulfate solution was under continuous stirring, whereas the other solutions were prepared. 2 ml of H₂O₂ at 30% concentration were diluted in 48 ml of deionized water. Then the hydrogen peroxide solution was slowly added to the ferrous sulfate solution under continuous stirring conditions. At these conditions occurs the formation of the catalyst (a mixture of iron oxide-iron oxohydroxide nanoparticles). The sodium bicarbonate was prepared diluting 21 g of this salt into 180 ml of deionized water. Finally, 10 ml of hydrogen peroxide at 30 % concentration were diluted in 40 ml of deionized water. When all the solutions were prepared, a 13 W lamp with visible emission radiation was turned on and immediately started the addition of sodium bicarbonate solution (2 ml/m) and the addition of the second hydrogen peroxide solution (1 ml/m). The process was stopped after six hours of reaction.

3. ANÁLISIS

The samples were collected after six hours of reaction keeping at rest under refrigerated conditions for 24 h in order to settle to the bottom the catalyst. Then the sample was maintained at laboratory temperature (22 C) for three hours. After this time, the sample separated from the catalyst and analyzed by Raman spectroscopy using a Cora 5001 Anton Paar instrument). The Raman analysis was developed in the low wave number range.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In the Figure 1 it is presented the measured Raman spectrum of the obtained aqueous mixture after the six hours of reaction. libraries reference RW-61 of the Cora 5001 instrument and the spectrum of the mixture obtained after the reaction of the transformation of the CO₂ generated through bicarbonate ions (HCO₃⁻), hydrogen peroxide and visible radiation.



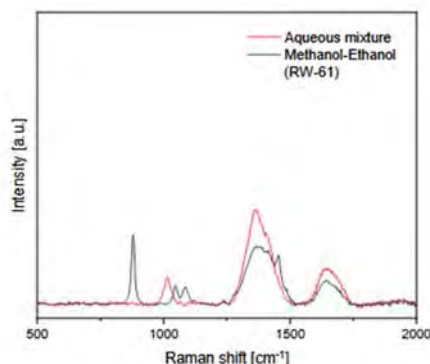


Figure 1 shows the Raman spectrum of a methanol-ethanol

The black Raman spectrum belongs to an artificial mixture of methanol-ethanol, which belongs to the library of the Cora 5001 Raman instrument. The red Raman spectrum belongs to the aqueous mixture of one experiment where was developed the transformation of the CO₂ in organic compounds. At the first sight, it is denoted that both Raman spectra, black and red, are similar excepting for the absence of the signal at 888.8 cm⁻¹ in the red spectrum. The signal with a maximum at 1040 cm⁻¹, in the red spectrum, depicts the molecular vibration originated by the C-O stretching vibration outside the methanol plane. This signal is related to the monohydric alcohol and thus can be related to both methanol and ethanol compounds. The second signal is a wide shoulder between 1280 and 1500 cm⁻¹ with a maximum at 1374 cm⁻¹ frequency. In our opinion this section of the Raman spectrum represents two overlapped signals related to both compounds, methanol and ethanol. Certainly, the wide shoulder incorporates the signal at 1461.9 cm⁻¹ corresponding to the anti-symmetric deformation of the CH₃ group. In fact, CH₃ is a common group for methanol and ethanol compounds. The second overlapped signal is associated to the main signal at 1287.3 cm⁻¹, which belongs to the deformation vibration of the CH₂ group. Indeed, in this case the CH₂ group just can be related to the ethanol compound. Surely, we agree that the signals of the obtained mixture could be considered as a weak signal for the ethanol compound, adding the absence of the 888.8 cm⁻¹ signal in the low wave number interval [14]. However, it would be necessary appraise that the spectrum of the Cora 5001 library is very similar to the one obtained from the mixture after the transformation of the CO₂ in the developed experiments.

5. CONCLUSIONS

The carbon dioxide can react with hydroxyl radicals (•OH) to form methanol and ethanol.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors acknowledge the financial support by Conahcyt under Grant CF-2023-I-698.

Authors also acknowledge Anton Paar company for the facilities to use the Cora 5001 Raman instrument.

REFERENCES

- [1]. Zoller S, Koepf E, Nizamian D, Stephan M, Patané A, Haueter Ph, Romero M, González-Aguilar J, Lieftink D, de Wit E, Brendelberger S, Sizmann A and Steinfeld A. *A solar tower fuel plant for the thermochemical production of kerosene from H₂O and CO₂*. *Joule* 6, 1606-1616 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.012>
- [2]. Warren KJ and Weimer AW, *Solar thermochemical fuels: Present status and future prospects*. *Solar Compass* 1, (2022) 100010, <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2022.100010>
- [3]. Serafini M, Mariani F, Basile F, Scavetta E and Tonelli D, *From traditional to new benchmark catalysts for CO₂ electroreduction*. *Nanomaterials* (2023), 13, 1723, <https://doi.org/10.3390/nano13111723>
- [4]. Chen Y, Miao RK, Yu Ch, Sinton D, Xie K and Sargent EH, *Catalyst design for electrochemical CO₂ reduction to ethylene*. *Matter* 7:25-37 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.matt.2023.12.008>
- [5]. Buonsanti R and Sheehan SW, *Catalyst discovery for electrochemical CO₂ conversion*. *Chem Catalysis* 1:751-756 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.checat.2021.08.011>
- [6]. Sun J and Wu J. *Unveiling Double layer effects in electrocatalytic CO₂ reduction*. *J. Phys. Chem. C*, 129:8946-8954 (2025), <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5c02134>
- [7]. Ma H, Ibáñez-Ale E, Ganganahalli R, Pérez-Ramírez J, López N and Yeo BS. *Direct electroreduction of carbonate to formate*. *J. Am. Chem. Soc.* 145:24707-24716, (2023). <https://doi.org/10.1021/jacs.3c08079>
- [8]. Costa Alvim J, Carvalho Soares L, Guerra Macedo N, Tayar Galante M, Sangali M, Caram R, de Siervo A, Chansai S, Hardacre C and Longo C. *Unassisted photoelectrochemical CO₂ conversion into liquid products by a light-responsive gas-diffusion electrode*. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 13:8988-8989 (2025), <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c01227>





- [9]. Zou X, Meng Y, Liu J, Cao Y, Cui L, Shen Z, Xia Q, Li X, Zhang S, Ge Z, Pan Y and Wang Y. *Niobium modification of CeO₂ tuning electron density of Nickel-Ceria interfacial sites for enhanced CO₂ methanation*. Inorg. Chem. 63:881-890 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.3c03881>
- [10]. Lee MG. *Tandem routs for converting carbon dioxide to high-value hydrocarbons: The roads to renewable chemicals and fuels*. Chem Mater. 37:807-822 (2025). <https://doi.org/20.2021/acschemmater.4c02372>
- [11]. Lu X, Gankhuyang T, Obata K, Yu Y and Takanabe K. *Selective control by modifying pressure, temperature, and ionomer decoration for CO₂ electroreduction using gas-diffusion Cu electrodes*. Chem Catalysis 4, 101030 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.checat.2024.101030>
- [12]. Ocampo-Gaspar M, Cano-Guzmán CF, Payan-Martínez LF, González-Reyes L, Hernández-Pérez I, Garibay-Febles V, Pérez-Orozco JP, Cabrera-Lara LI, Ramón-García ML, Galicia-Luis L and Suárez-Parra R. *Sizing the Fenton's Catalyst*, J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 353: 527-535 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.12.022>
- [13]. Castro-Ocampo O, Celaya AC, González-Reyes L, Hernández-Pérez I, Garibay-Febles V, Jaramillo-Quintero OA, Lara-García HA, Muñoz J and Suárez-Parra R. *Understanding hydroxyl radicals addition to CO₂ on α -Fe₂O₃(110) surface photocatalyst for organic compounds production*. J. Fuel 310 (2022) 122464, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122465>
- [14]. Emin A, Hushur A and Mamtimin T. *Raman study of mixed solutions of methanol and ethanol*. AIP Advances 10, 065330 (2020) <https://doi.org/10.1063/1.5140722>





Plan de despliegue de reactores nucleares para México

JUAN LUIS FRANÇOIS LACOUTURE¹, CECILIA MARTÍN DEL CAMPO¹, PAMELA F. NELSON¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Jiutepec, Morelos, 62550, México

Autor de Correspondencia: Juan Luis François (e-mail: jlfl@fi-b.unam.mx).

RESUMEN El bienestar social sólo puede ser duradero si está sustentado por el crecimiento económico, industrial y comercial y eso requiere energía asequible y no contaminante. La energía nuclear es una tecnología de generación eléctrica limpia que no emite gases de efecto invernadero, segura, despachable, con altos factores de planta y costos de producción competitivos. La incorporación de la energía nuclear, con reactores grandes o pequeños, puede contribuir significativamente a la diversificación energética que nuestro país requiere para disminuir la generación con combustibles fósiles; en particular, reducir la dependencia del gas natural importado, y aumentar la participación de energías limpias en la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La energía nuclear representa una opción que contribuye a la seguridad energética, la confiabilidad y la continuidad del suministro del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Por lo tanto, es necesario establecer un plan de despliegue de reactores nucleares acorde con las características del sector energético mexicano. En este trabajo se presenta una propuesta de plan de despliegue de reactores nucleares, en la que se identifican los actores que deben participar desde el liderazgo gubernamental de la Secretaría de Energía, así como, de manera indicativa, las acciones principales a realizar. Adicionalmente, se describe un escenario de expansión de capacidad nuclear para el año 2060, en el que se incorporan 16.66 GW.

PALABRAS CLAVE: Políticas energéticas, Reactores nucleares, Planeación energética, Energía limpia.

1. INTRODUCCIÓN

El bienestar social sólo puede ser duradero si está sustentado por el crecimiento económico, industrial y comercial, y eso requiere energía asequible y no contaminante. La energía nuclear ha demostrado a nivel mundial y en México, con la operación exitosa de la Central Nuclear de Laguna Verde

(CNLV) por más de 30 años, que es una tecnología de generación eléctrica limpia, que no emite gases de efecto invernadero, segura, despachable, con los más altos factores de planta y con costos de producción competitivos. La relevancia de la energía nuclear en la mitigación del cambio climático es real, actualmente operan en el mundo 416 reactores nucleares en 31 países (62 en construcción), con una capacidad de 376.3 GW, lo que representan 20,355 años-reactor de experiencia operacional [1], y que producen alrededor del 10 % de la electricidad anual del mundo libre de emisiones de gases de efecto invernadero. La energía nuclear es hoy la segunda mayor fuente de electricidad baja en carbono, después de la hidroeléctrica; ha evitado alrededor de 55 Gt de emisiones de CO₂ en 50 años de utilización, casi el equivalente a dos años de emisiones globales de CO₂ relacionadas con la energía [2]. Gran parte de las ventajas de esta tecnología es que se basa en un proceso de fisión nuclear, y que su combustible tiene la mayor densidad energética de entre todos los combustibles.

La incorporación de la energía nuclear en el sistema eléctrico nacional, con reactores grandes o pequeños, puede contribuir significativamente a la diversificación energética que nuestro país requiere para disminuir la generación con combustibles fósiles; en particular, reducir la dependencia del gas natural importado, y contribuir al incremento de la participación de energías limpias para coadyuvar con nuestras metas de reducción de gases de efecto invernadero, con una tecnología que es despachable, de continuidad de suministro, y de alta confiabilidad. Además, es generadora de empleos de alta calidad y, por ser una tecnología avanzada, impulsa el desarrollo tecnológico de los países que la utilizan.

En 2023 la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicó la Evaluación de Estrategias de descarbonización para la actualización de la estrategia nacional de cambio climático de México [3]. Los escenarios de este estudio fueron preparados por los





consultores Ea Energy Analysis y la Unidad de Planeación Energética de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a solicitud del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Se usó el modelo de optimización Balmorel, que busca la expansión de mínimo costo de generación sujeta a restricciones, el cual ha sido ampliamente utilizado y validado para modelar sistemas eléctricos grandes. Se encontró que para un escenario 1p5 en el cual se aplica un límite de emisiones de 0 t de CO₂ en el año 2050, se necesitaría una capacidad instalada de 616 GW para cubrir una generación anual de electricidad de alrededor de 840 TWh. Cabe resaltar que, bajo las características técnico-económicas asumidas respecto a las diferentes opciones de inversión, la opción nuclear resulta muy favorable en optimizaciones de mínimo costo, con fuertes limitaciones en las emisiones de CO₂, ya que es una tecnología de carga base, neutra en emisiones de CO₂ y con costos marginales a corto plazo muy bajos. Sin embargo, se decidió imponer algunas restricciones para considerar algunas de las complicaciones de la energía nuclear, como los horizontes de planificación y los tiempos de construcción muy largos, así como la opinión política desfavorable. Por ello, en la optimización se consideró no permitir la opción nuclear antes del año 2028, con un crecimiento lineal desde 1.6 GW en ese año hasta un tope de 5 GW en 2050. Una restricción adicional fue que sólo se instalara nuclear si generaba suficiente energía durante el año para un factor de capacidad del 80%. Estas restricciones implicaron anular la posibilidad de la tecnología nuclear. El escenario instaló solar (172.5 GW), eólica (154 GW) y baterías (235 GW). Las baterías aportan flexibilidad operativa al sistema, pero implican la fuerte dependencia de materiales críticos y de uso de agua de enfriamiento, lo cual no está modelado. La energía nuclear utiliza entre 2 y 3 veces menos cobre y níquel que la solar y la eólica por TWh [4] gracias a la densidad energética insuperable y su factor de capacidad típico. Sin embargo, queda por probar algunos escenarios en los que se considere un plan definido de adiciones de capacidad nuclear y por examinar las capacidades resultantes de eólica, solar y baterías, derivadas de la optimización con Balmorel, para cumplir con la energía demandada y emisiones cero.

Por otro lado, en los ejercicios de planeación publicados por el Centro Nacional de Control de Energía (PAMRNT 2021-2035, Anexo 4.23) [5], se considera un despliegue de energía nuclear de 11.51 GW al año 2050, contribuyendo con 4.5% de la capacidad instalada de 255 GW en ese escenario. Recordar

Tomando en cuenta el tamaño del país y el crecimiento esperado de la demanda de generación eléctrica para cumplir con las metas de bienestar social que el país requiere, los análisis de expansión eléctrica sostenible indican que la energía nuclear debería tener un

despliegue nuclear mayor y planearse de inmediato de manera integral y coordinada por el gobierno de nuestro país. El objetivo de este artículo es presentar una propuesta de plan de despliegue de reactores nucleares, en la que se identifican los actores que deben participar desde el liderazgo gubernamental de la Secretaría de Energía (SENER), así como, de manera indicativa, las acciones principales a realizar. Adicionalmente, de manera ilustrativa, se presenta un escenario de expansión de la capacidad nuclear al año 2060, en el que se plantea incorporar 16.66 GW de capacidad mediante reactores nucleares.

2. PLANEACIÓN DEL DESPLIEGUE DE REACTORES NUCLEARES

La energía nuclear representa para México una opción de alta seguridad energética, confiabilidad, y continuidad de suministro que otras energías limpias no ofrecen, por lo tanto, es necesario que se establezca un plan de despliegue de reactores nucleares. Para esto, se requiere que el Gobierno federal, a través de la Secretaría de Energía (SENER), realice las acciones siguientes:

2.1. Definir un plan de expansión del sector eléctrico con la incorporación de reactores nucleares

La planeación es un proceso indispensable para la toma de decisiones informadas en conocimiento para alcanzar objetivos deseados. En particular, la planeación energética debe ser un proceso continuo, que permita determinar la satisfacción de una demanda energética, en este caso de electricidad, con los mejores recursos materiales, humanos y tecnológicos al menor costo nivelado de generación, sujeto a restricciones ambientales y sociales. En este sentido, es fundamental llevar a cabo un plan de expansión del sector eléctrico nacional en el que se incorporen reactores nucleares y otras tecnologías de generación limpia, en diversos horizontes de tiempo, pero al menos al 2060, treinta y cinco años a partir de ahora. Este plan debe tener en cuenta, desde luego, la factibilidad y competitividad económica de las tecnologías de generación, pero también su contribución a la reducción de gases de efecto invernadero, a la confiabilidad y estabilidad de la red eléctrica, a la contribución al desarrollo tecnológico y a la formación de capital humano de calidad y bien remunerado, entre otros atributos. Para la realización del plan de expansión del sector eléctrico, la SENER se puede apoyar en instituciones que tienen experiencia en el tema como la Unidad de Planeación Energética de la UNAM.

Algunos factores por considerar son:

- Análisis de la demanda energética actual y futura de México, considerando el crecimiento demográfico,





desarrollo industrial, electromovilidad, centros de datos y metas de descarbonización.

- Evaluación del mix energético actual y la contribución potencial de la energía nuclear para diversificarlo y reducir la dependencia de combustibles fósiles.
- Consideración de los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y compromisos internacionales de México (Acuerdo de París, etc.).

2.2. Coordinar la participación de los diferentes actores

Los principales actores son la CFE, el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), la Comisión Nacional de Energía (CNE), el Servicio Geológico Mexicano (SGM), el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), las Instituciones de Educación Superior tales como la UNAM, la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), etc., la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y la Secretaría del Bienestar, entre otras.

3. ACCIONES PRIORITARIAS A SER COORDINADAS POR LA SENER

3.1. Complementar los estudios existentes

A través de la CFE y con la opinión del CENACE, complementar y actualizar los estudios de factibilidad para determinar la ubicación y la capacidad de los reactores a instalar. Investigar y definir los sitios de instalación de reactores nucleares más convenientes en las diferentes regiones del Sistema Eléctrico Nacional. El sitio de Laguna Verde, Ver., por tener dos reactores nucleares operando, cuenta ya con la infraestructura, certificación y aceptación social para ser considerado como el sitio lógico para instalar reactores nuevos. Estudios preliminares indican que hasta dos reactores de potencia grande (1,000 – 1,400 MW) podrían construirse [6]. Un estudio de sitios debe identificar posibles ubicaciones para nuevas plantas nucleares, considerando factores geológicos (sismicidad), disponibilidad de agua (para enfriamiento), infraestructura existente (red eléctrica, transporte, etc.), densidad poblacional y viabilidad social. Posteriormente, la CFE deberá preparar las bases de la licitación para la compra de los reactores. En esta etapa se debe establecer contacto con empresas de base tecnológica y proveedores de reactores nucleares para negociar mejores ofertas, condiciones de financiamiento, porcentaje de participación nacional,

transferencia de tecnología, plazos de construcción, etc. Se debe considerar el análisis de las diferentes tecnologías de reactores nucleares disponibles (PWR, BWR, SMRs, etc.), incluyendo su madurez, seguridad, eficiencia, costos de construcción y operación, y compatibilidad con las capacidades de la industria mexicana. Se debe prestar especial atención a los SMRs por su flexibilidad y su menor inversión inicial. La energía nuclear facilitará la prevalencia de 54 % de generación de la CFE en el SEN.

3.2. Fortalecer al órgano regulador

Fortalecer la CNSNS, ya que tendrá a su cargo el licenciamiento de los reactores nuevos, así como de los nuevos sitios en que se instalarán, y la actualización de la normatividad y la regulación. Revisar el marco legal y regulatorio existente para la energía nuclear en México (Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, que otorga a la CFE el derecho exclusivo de generar electricidad con combustibles nucleares), identificar posibles adecuaciones o nuevas normativas para tecnologías avanzadas (ej. SMR), e implementar de las mejores prácticas internacionales en seguridad nuclear. La participación de la CNSNS en el despliegue de reactores nuevos es de suma importancia, dado que el proceso de licenciamiento de éstos podría ser un cuello de botella si el proceso no se realiza de manera ágil, profesional y oportuna. Desafortunadamente, en los últimos años la CNSNS no ha tenido el apoyo presupuestal necesario, más allá de lo mínimo indispensable para cumplir con su misión, de manera que debe ser fortalecida, económicamente y con capital humano competente, para enfrentar el reto que representa el licenciamiento de nuevos sitios y reactores.

3.3. Fortalecer a los institutos de investigación

Fortalecer a los institutos de investigación del sector, ININ e INEEL, para la realización de proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico, que permitan transitar hacia la independencia tecnológica. Estos dos institutos del sector energético del país deberán también ser fortalecidos, tanto en presupuesto, como en capital humano, para responder al reto que supone una transición en materia de tecnología nuclear con la meta de incrementar gradualmente la independencia tecnológica, convirtiendo en un apoyo fundamental para la creación de empresas de alta tecnología nacionales.

3.3. Financiar proyectos de investigación

A través de la SECIHTI, financiar proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico, y apoyar a Instituciones de Educación Superior (UNAM, UAM, IPN, etc.) para la formación del capital humano requerido en todas





las actividades relacionadas con el desarrollo e implementación del plan de despliegue nuclear.

3.4. Definir una estrategia para el ciclo del combustible

Definir una estrategia a largo plazo de ciclo de combustible nuclear, que incluya la búsqueda de la independencia tecnológica en algunas de sus etapas, como la producción de uranio (torta amarilla) y la fabricación de ensambles combustibles. Evaluar la posibilidad de reprocesamiento de combustible gastado y la utilización de nuevas tecnologías de combustible.

3.5. Reactivar la explotación de minerales nucleares

Con el SGM, definir y poner en acción una política de exploración y explotación de minerales nucleares destinados al consumo interno y/o para exportarlos como materia prima esencial del combustible que se va a demandar para los reactores nucleares que se están construyendo en el mundo y los que están en planeación. La minería del uranio puede representar una oportunidad de negocios para México.

3.6. Definir una política de gestión de combustible gastado

Definir y poner en acción una política de gestión de combustible gastado, desechos radioactivos de alto nivel, incluyendo almacenamiento temporal y, eventualmente, repositorios geológicos profundos, y el desmantelamiento de instalaciones nucleares

3.7. Impulsar otras acciones relevantes

- Establecer el contacto con empresas de base tecnológica, proveedores de reactores nucleares, para la negociación de mejores ofertas, condiciones de financiamiento, porcentaje de participación nacional, transferencia de tecnología, plazos de construcción, etc.
- Con la Secretaría de Economía realizar una evaluación de la capacidad industrial local para participar en la construcción y mantenimiento de reactores, así como definir estrategias y planes de acción para el fomento industrial de cadenas productivas nacionales y el fomento de la inversión directa. Incentivar a empresas privadas para que inviertan en proyectos de ingeniería, construcción, y fabricación de combustible y de equipos y componentes.
- Con la Secretaría de Bienestar definir estrategias y planes de acción para sensibilizar a la población acerca de la seguridad y los beneficios de la energía nuclear, y de cómo la instalación de reactores nucleares puede beneficiar a la comunidad. Con el apoyo de profesionales del sector, establecer las acciones concretas que se llevarán a cabo, como campañas

informativas, talleres educativos, visitas guiadas a la CNLV, pláticas con expertos, etc.

- Organizar con la Coordinación General de Comunicación Social del Gobierno Federal, y la Coordinación de Comunicación Corporativa de CFE, la implementación de una estrategia de comunicación efectiva que utilice diversos medios, como redes sociales, medios tradicionales (radio, televisión, prensa), y eventos comunitarios.
- Con la SHCP determinar y aportar los fondos necesarios para llevar a cabo el plan de despliegue de reactores nucleares. Explorar de modelos de financiamiento, incluyendo inversión pública, asociaciones público-privadas, créditos internacionales y fuentes de financiamiento verde.
- Aprovechar todos los programas con los que el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) brinda apoyo y asesoría sobre herramientas y metodologías para la planeación del sistema nucleoelectrico sostenible adecuado a las características del país.

4. CONSIDERACIONES ESENCIALES PARA EL DESPLIEGUE NUCLEAR

- **Seguridad:** La seguridad debe ser la prioridad número uno en todas las etapas del plan. Cumplir con los estándares internacionales de seguridad nuclear es indispensable. Implementar una regulación informada en riesgo incrementa la seguridad. Al considerar los riesgos específicos, se pueden tomar decisiones más informadas y efectivas para proteger los bienes y la población y dirigir los recursos de manera efectiva.
- **Transparencia:** Mantener una comunicación abierta y transparente con el público, las comunidades locales y los medios de comunicación es de vital importancia para la aceptación y éxito del plan.
- **Resiliencia:** El plan debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a cambios tecnológicos, económicos y políticos.
- **Voluntad política:** Se requiere de un diálogo a alto nivel para asegurar un compromiso político a largo plazo con la energía nuclear, que trascienda los cambios de administración.

5. ESCENARIO DE EXPANSIÓN NUCLEAR AL 2060

Aquí se presenta un escenario indicativo para la expansión del sistema nucleoelectrico nacional al 2060 que puede servir



de base para analizar posteriormente, con mayor profundidad, más escenarios que surjan como resultado de las acciones del plan nuclear que coordine la SENER.

Se dan los valores de capacidad y de generación para cada cinco años dentro del periodo de estudio. La Figura 1, muestra el despliegue de capacidad de energía nuclear que se puede incorporar al Sistema Eléctrico Nacional para contribuir con generación limpia por parte de la CFE. Las primeras adiciones podrían iniciar operación en el año 2035. En la gráfica se observa la capacidad que se retirará en 2050 y 2055 correspondiente a las unidades 1 y 2 de la CNLV que terminarán en esos años su licencia. Se muestra también que en el año 2060 el escenario acumula 16.66 GW instalados de capacidad nuclear. La Figura 2 describe una propuesta de la contribución de las diferentes regiones del país a la capacidad nuclear del SEN. Para esta distribución de capacidad se consideró que las plantas nucleares podrían ir sustituyendo la generación de las plantas fósiles más antiguas que van a ser retiradas al terminar su vida útil y que deberían de ser reemplazadas por plantas generadoras de energía limpia que pueda operar de manera continua, lo que no pueden hacer la solar y la eólica.

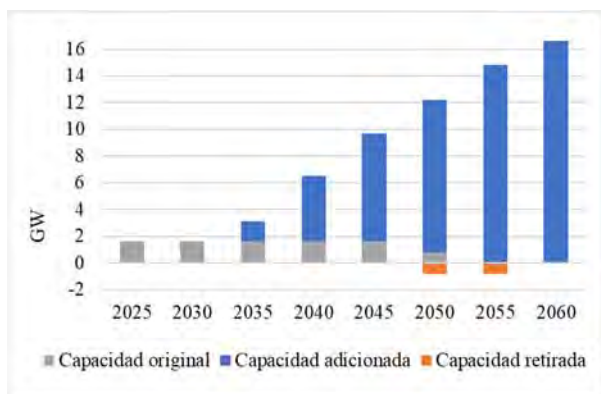
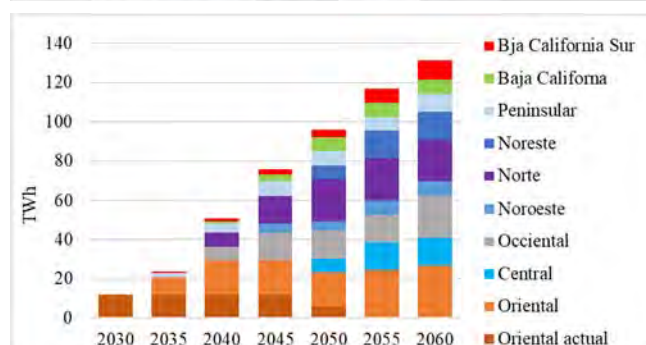
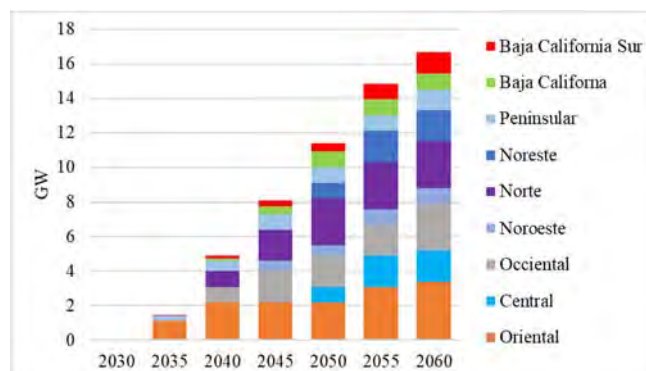


FIGURA 1. Escenario de despliegue de capacidad nuclear en el SEN

La generación de electricidad de origen nuclear que puede aportar este escenario de capacidad se muestra en la Figura 3. Los valores de generación de electricidad son indicativos, se obtuvieron considerando que las centrales de la CNLV operarían con un factor de planta de 0.85 y los nuevos reactores con un factor de 0.90, el cual es conservador respecto a los valores que reportan los proveedores de los reactores.

FIGURA 2. Escenario de adición acumulada de capacidad nuclear en las regiones del SEN

La generación anual de este escenario nuclear en el año



2060 es aproximadamente 131 TWh, lo cual representa una contribución a la prevalencia del estado y a la energía limpia y firme que, combinada con hidroeléctrica, geotermia y rebombeo, ofrece una expansión eléctrica que no implica tanta necesidad de energía solar fotovoltaica y eólica con baterías de respaldo. La idea es disminuir el correspondiente uso de superficie para las instalaciones solares y eólicas, así como los materiales críticos para las baterías y las plantas solares y eólicas. También, se podrán disminuir los requerimientos de agua para los procesos de minería de tantos materiales, para el enfriamiento de las baterías y para el lavado de los paneles solares.

FIGURA 3. Escenario de generación anual de electricidad con energía nuclear en las regiones del SEN

La propuesta es analizar escenarios de expansión que, con una contribución nuclear, no requieran tanta capacidad instalada con las implicaciones de uso de espacio territorial.

6. CONCLUSIONES

La contribución más importante de este trabajo es la propuesta de un plan de despliegue de reactores nucleares, en el que se identifican a los actores que deben participar desde el liderazgo gubernamental de la Secretaría de Energía, así como, de manera indicativa, las principales acciones a realizar. Adicionalmente, se presentó un

escenario de expansión nuclear al año 2060, en el que se incorporan 16.66 GW de capacidad con reactores nucleares en las regiones del país. Este escenario sirve de base para desarrollar escenarios del SEN con todas las tecnologías de generación y los enlaces de transmisión, que permitan evaluar el papel de la energía nuclear para facilitar la penetración de las renovables solar y eólica sin el requerimiento intensivo de baterías.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la asesoría brindada por el OIEA desde el año de 2014 a través de diferentes etapas y talleres del Proyecto Internacional sobre Ciclos de Combustible y Reactores Nucleares Innovadores (INPRO), por mencionar algunas: Hojas de Ruta para una Transición a Sistemas de Energía Nuclear Sostenible a Nivel Mundial; Modelización y Evaluación de Sistemas de Energía Nuclear utilizando la Metodología INPRO; Análisis de escenarios y apoyo a la toma de decisiones para planificar una mayor sostenibilidad de la energía nuclear; Escenarios de Despliegue Sostenible de Reactores Modulares Pequeños. También, la capacitación a través del proyecto del OIEA, Apoyo al desarrollo de planes energéticos integrales considerando el clima, la tierra, la energía y el agua en América Latina y el Caribe. Los autores también expresan su agradecimiento al CONAHCYT, ahora integrado en la SECIHTI, por los apoyos a la investigación a través del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras. Agradecen también a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindar apoyo a la realización de estos estudios, como parte de las actividades de investigación y desarrollo dentro de la labor académica.

REFERENCIAS

- [1]. International Atomic Energy Agency. (2025). Power Reactor Information System. <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
- [2]. International Energy Agency. (2025). Nuclear Power in a Clean Energy System. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>
- [3]. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2023). Evaluación de estrategias de descarbonización para la actualización de la estrategia nacional de cambio climático de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/921441/05_2024_Informe_Modelaciones_110624_v7.pdf
- [4]. International Energy Agency. (2021). The role of critical minerals in clean energy transitions. IEA.

<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

- [5]. Centro Nacional de Control de Energía. (2021). Programas de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución 2021 – 2035. https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Programa_RNT_RDG.aspx
- [6]. Cruz, H. J. (2013). Evaluación de las distintas alternativas para los sistemas de enfriamiento de reactores nucleares generación III en el sitio de Laguna Verde [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2013/mayo/0694762/Index.html>



Juan Luis François Lacouture. Desde 1999 es profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y de 2019 a 2022 fue Coordinador del Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Es Ingeniero en Energía egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (1979), e Ingeniero Nuclear por el Instituto Nacional de Ciencias y

Técnicas Nucleares de Francia, país en donde obtuvo el grado de Doctor en Ciencias Físicas, especialidad en Física de Reactores Nucleares por la Universidad de París (1987).

Iniició su vida profesional en el año de 1979 en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, y en 1988 se incorporó al Instituto de Investigaciones Eléctricas. Sus áreas de interés son: diseño y análisis de reactores nucleares, administración de combustible nuclear y producción de hidrógeno con energía nuclear.

Es Investigador Nacional Nivel 3 del Sistema Nacional de Investigadores. Miembro titular de la Academia de Ingeniería de México, miembro regular de la Academia Mexicana de Ciencias y miembro de la Academia Internacional de Energía Nuclear. Ha tenido una vida gremial activa, siendo presidente de la Sociedad Nuclear Mexicana, de la Sección Latinoamericana de la Sociedad Nuclear Americana, de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Nuclear de la Academia de Ingeniería, del *Pacific Nuclear Council*, de la Red Mexicana de Educación y Capacitación e Investigación Nuclear, de la Red Latinoamericana para la Educación y Capacitación en Tecnología Nuclear y miembro de la Junta Directiva de la *American Nuclear Society*. Actualmente es el editor en jefe de la revista *Ingeniería Investigación y Tecnología* de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Cecilia Martín del Campo Márquez. Es profesora en el Departamento de Energía Eléctrica y Sostenibilidad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, CDMX, México. Es directora de la Unidad de Planeación Energética de esa institución. Es Ingeniera en Energía por la UAM, Ingeniera Nuclear por el Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Nucleares de Francia y tiene el Doctorado en Ciencias Físicas, especialidad en Física de Reactores Nucleares de la Universidad de París XI, Francia. Es miembro de la Academia de Ingeniería de México y actualmente es presidenta de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Nuclear. Forma parte de la Academia Mexicana de Ciencias, de la Academia Mexicana de



Francois Lacouture J.L. et al.



Energía y de varios colegios profesionales de ingeniería. Es miembro del SNII (Nivel 2). Su línea de desarrollo es la planeación energética sostenible. Cecilia ha sido contraparte en varios proyectos del OIEA-INPRO relacionados con sistemas nucleoelectricos y reactores modulares pequeños. Ha coordinado varios proyectos enfocados a la

modelación del sector eléctrico y el sector energético para el análisis de escenarios de transición energética de largo plazo. Recientemente fue nombrada consejera independiente del Consejo de Administración de la CFE.



Pamela Fran Nelson Edelstein. Desde 2001 es académica en la UNAM y es líder de la línea de Análisis de Riesgos en la Facultad de Ingeniería. Obtuvo su licenciatura y maestría en UCLA (1982, 1985) y su doctorado en Ingeniería en Energía en la UNAM (2016). Inició su carrera profesional en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (ahora INEEL), apoyando el desarrollo del Análisis Probabilístico de Seguridad (APS), los

procedimientos de operación de emergencia y los niveles de acción de emergencia de la Central Nucleoelectrica de Laguna Verde. Posteriormente, trabajó para el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua apoyando en actividades para la predicción de eventos naturales con el cambio climático. Es miembro titular de la Academia de Ingeniería de México, siendo la Presidenta de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Nuclear (2022-2024), miembro fundador de la Sociedad Nuclear Mexicana, Presidenta del subcomité que desarrolla una norma para diseño de sistemas de plantas con peligro y miembro de la Junta Directiva de la Códigos y Estándares Nucleares de la *American Society of Mechanical Engineers*.





Evaluación de procesos biohíbridos para la remoción de contaminantes en agua residual y la generación de biohidrógeno con un consorcio de microalgas

J. A. ACOSTA PIÑA^a, *S. M. SOLARES GARCÍA^{a,b}, K. MORTERA TINOCO^{a,c}, J.G. VÁZQUEZ ARENAS^a

^aCentro Mexicano de la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto S/N, Ticoman, Gustavo A. Madero, 07340 Ciudad de México, México.

^bLaboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles (LaNDACBio), Ciudad de México, 07340, México.

^cUnidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del I.P.N., Av Acueducto s/n, Colonia Barrio la Laguna Ticomán, Gustavo A. Madero, 07340 Ciudad de México, CDMX

Autor de Correspondencia: Selene Montserrat Solares Garcia (e-mail: sgarcias@ipn.mx).

RESUMEN El agua residual es considerada un insumo dentro del modelo de economía circular, conforme a lo establecido en la Ley General de Economía Circular publicada en 2023. Esta visión reconoce que diversos contaminantes presentes en aguas residuales pueden aprovecharse como nutrientes para microorganismos. Entre ellos destacan las microalgas, las cuales utilizan especies nitrogenadas y fosfatadas en su metabolismo para generar bioproductos de valor agregado como lípidos, proteínas y pigmentos. Además de su capacidad para la recuperación de nutrientes, se ha demostrado que cepas puras de microalgas pueden integrarse en sistemas bioelectroquímicos, desempeñando un papel dual al consumir dióxido de carbono (CO₂) durante la fotosíntesis y contribuir a procesos de biorremediación.

En el presente proyecto se evaluará la capacidad de un consorcio de microalgas para generar de forma simultánea biohidrógeno (bioH₂) y bioproductos de interés industrial dentro de una biocelda de combustible, diseñada para operar con agua residual real y sintética. Esta propuesta representa una alternativa de tecnología sostenible orientada a la

remoción de contaminantes emergentes y a la producción de energía renovable.

El sistema se diseñará como una configuración biohíbrida, utilizando un consorcio y una biopelícula de microalga, maximizando la eficiencia de remoción y la recuperación energética. Con ello, se busca demostrar la viabilidad de un aprovechamiento dual: tratamiento eficiente de aguas residuales y generación simultánea de energía limpia.

Posteriormente se propone contactar el efluente de la biocelda de microalgas a un sistema de oxidación avanzada combinado con electrocoagulación, este sistema funcionará con el mismo enfoque, tratar los contaminantes emergentes, y evaluar la generación de H₂, en conjunto este sistema biohíbrido se pretende eliminar por completo los contaminantes emergentes a seleccionar y hacer el sistema sustentable al generar energía.

PALABRAS CLAVE: Bioceldas, Microalgas, Contaminantes, Biohidrógeno.



1. INTRODUCCION

1.1. Problemática de los contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes (CE) fármacos, disruptores endócrinos, productos de cuidado personal persisten en aguas residuales debido a su baja remoción en tratamientos convencionales [1]. Estudios en México confirman la presencia de contaminantes como (sulfametoxazol, ciprofloxacina, norfloxacina y ofloxacina) por medio de lodos activados y radiación ultravioleta se eliminaron entre el 62 y 98% [2]. Se detectaron en el río Apatlaco Cuernavaca 85.5-624.3 µg/L de 4-nonilfenol estrógeno sintético 17α-etinilestradiol. asociados a riesgos carcinogénicos y disrupción endócrina [1]. La fuente principal es la descarga de aguas residuales domésticas y hospitales.

En la Figura 1 se presenta un esquema del ciclo del agua donde se señalan las principales fuentes de generación de contaminantes emergentes (viviendas, hospitales, industrias, agricultura y ganadería), así como su tránsito hacia las plantas de tratamiento de aguas residuales, los ríos y las aguas subterráneas. El diagrama ilustra cómo estos contaminantes, al no ser completamente removidos en los procesos de depuración convencionales, pueden permanecer en los cuerpos de agua y reincorporarse al sistema de abastecimiento de agua potable, lo que representa un riesgo potencial para la salud y el ambiente.

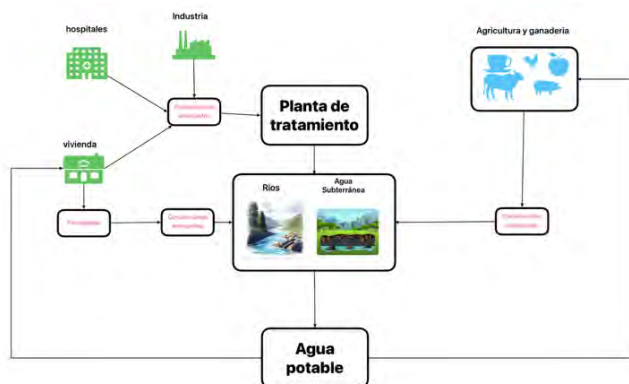


Figura 1 producción de contaminantes emergentes y su ciclo con los medios de producción y consumo.

1.2. Limitaciones de las tecnologías actuales

Las plantas de tratamiento tradicionales pueden eliminar solo el 50% de los contaminantes farmacéuticos, de hecho las

plantas de tratamiento son las principales fuentes de liberación de contaminantes en los cuerpos de agua[3] Estudios revelan que solo el 3.33% de las plantas de tratamiento cuenta con tratamientos terciarios donde usualmente suelen ser tratados los contaminantes emergentes. Ante este escenario, las soluciones basadas en biotecnología algal representan no solo una alternativa técnica, sino un imperativo socioambiental para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 (agua limpia) y 7 (energía asequible)."

Las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales presentan una notable ineficiencia en la eliminación de contaminantes emergentes, como fármacos, hormonas, pesticidas, microplásticos y productos de cuidado personal, debido a que sus procesos están diseñados principalmente para remover materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes, pero no compuestos de baja concentración, alta estabilidad química o comportamiento recalcitrante. Tecnologías habituales como lodos activados, sedimentación y filtración no logran degradar completamente estas moléculas, que en muchos casos son hidrofóbicas o persistentes, lo que provoca que una fracción significativa de ellas pase intacta al efluente final y se vierta a cuerpos de agua. Esto no solo representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos, sino que también puede favorecer procesos de bioacumulación y resistencia microbiana, evidenciando la urgencia de implementar procesos avanzados o biohíbridos que mejoren su eliminación.

1.3. innovación propuesta: Biocelda con consorcio de microalga

Este estudio propone un sistema que integra una comunidad bacteriana proveniente de plantas de tratamiento municipales para oxidación anódica y un consorcio de microalgas para producción catódica de bioH₂, creando un sistema simbiótico de remediación y generación energética.

1.4. Bioceldas de combustible microbianas.

Las bioceldas de combustible convencionales operan mediante bacterias en el ánodo, que oxidan la materia orgánica de aguas residuales, liberando electrones y protones, fluyendo por un circuito externo hacia el cátodo, donde aceptores los reducen generando electricidad.

1.4.1 Biocelda de cámara única SCMFC



La Celda SCMFC (Single Chambered Microbial Fuel Cells) integra un ánodo y un cátodo en un único compartimiento con una membrana separadora. El cátodo está expuesto al aire, se recubre con biopelículas de algas que generan oxígeno mediante fotosíntesis para las reacciones de reducción. Esta celda es ideal para aguas residuales urbanas o industriales.

1.4.2 Biocelda de doble cámara DCMFC

La Celda Double chambered microbial fuel cells La Celda (Double chambered microbial fuel cells) emplea dos compartimientos separados por una membrana de intercambio protónico (PEM). Las algas se ubican en el cátodo, ahí aprovechan el CO₂ proveniente del ánodo para producir O₂ para mejorar la reducción de electrones. destaca por su alta eficiencia en tratamiento de aguas y generación eléctrica.

1.5. Marco regulatorio y vacíos normativos en México

En México la regulación de contaminantes emergentes comenzó en 1976 con estudios que definieron parámetros para las descargas ambientales, después las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) establecen los límites permisibles de contaminantes en descargas. Sin embargo, la regulación de contaminantes emergentes (CE) presenta desafíos significativos debido a la ausencia de límites específicos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.[5] [6]

El derecho a tener agua limpia se estableció en las leyes mexicanas mediante la reforma al artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Es relevante considerar que el vacío legal sobre CE en México se manifiesta como una arista pendiente en el contexto del cumplimiento progresivo del derecho humano al agua y al saneamiento. El establecimiento de normativas sobre los límites máximos permisibles que regulen la manifestación de microcontaminantes peligrosos en aguas nacionales, así como el desarrollo de métodos analíticos de detección y remoción de los mismos son necesarios para complementar la normatividad vigente y las disposiciones jurídicas actuales sobre la disponibilidad de abasto y el acceso al agua para consumo humano y uso doméstico, de forma suficiente y salubre. Hasta ahora ningún reglamento, normativa o ley constitucional en México hace mención de los CE de forma específica, a pesar de ser sustancias nocivas para la salud

humana a largo plazo y cuyos efectos pasan inadvertidos, hasta que son graves. [7]

La Unión Europea ha establecido un marco normativo robusto para la gestión de contaminantes emergentes en el agua, destacando dos directivas clave, Directiva 2008/105/CE (modificada por 2013/39/UE), y Directiva (UE) 2020/2184 sobre la calidad del agua destinada al consumo humano

- Directiva 2008/105/CE (modificada por 2013/39/UE)

Esta directiva establece Normas de Calidad Ambiental (EQS) para sustancias prioritarias y otros contaminantes en aguas superficiales. Su objetivo es alcanzar un buen estado químico de las aguas, promoviendo la reducción gradual de la contaminación por sustancias peligrosas. En su revisión de 2013, se incorporaron 12 nuevas sustancias, ampliando la lista a 46, aunque no todas son CE

- Directiva (UE) 2020/2184 sobre la calidad del agua destinada al consumo humano

Esta directiva introduce un mecanismo de "lista de observación" para monitorizar sustancias que podrían estar presentes en el agua potable y representar un riesgo potencial para la salud humana. La primera lista, adoptada en 2022, incluye compuestos disruptores endocrinos como el beta-estradiol y el nonilfenol. Este enfoque permite una vigilancia continua y la actualización de las sustancias monitorizadas en función de nuevos datos científicos y evaluaciones de riesgos.

La comparación entre México y Europa revela una disparidad significativa en la gestión del tratamiento de aguas residuales y la gestión de contaminantes emergentes. Mientras que Europa ha implementado sistemas avanzados respaldados por regulaciones estrictas, México enfrenta desafíos relacionados con la infraestructura, la capacidad operativa y la falta de un marco regulatorio específico para los CE.

2.METODOLOGIA

2.1 Cultivo del Consorcio de microalgas.

El consorcio de microalgas se cultivará en medio BG-11 modificado bajo condiciones controladas de iluminación LED





(600 luxes) y fotoperiodo ([12] h luz/oscuridad), con monitoreo diario de densidad celular.

2.2. Recolección de Agua

Se empleará agua residual sintética y Aguas residuales domésticas de San Juan Ixhuatepec, Tlalnepantla, Estado de México. El volumen mínimo de los recipientes de recolección es de 2 dm³ según la NMX-AA-003-1980 Volumen: Se recolectarán 10 L de agua en recipientes de polietileno oscuro. [8]

El muestreo se realizará en horario pico (10:00-14:00 h) para captar la máxima carga contaminante, utilizando recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE) color ámbar con tapas herméticas. Se recolectarán 10 L por muestra siguiendo el protocolo de muestreo compuesto: integrando 12 submuestras tomadas cada 15 minutos durante 3 horas para representar la variabilidad horaria. Inmediatamente después de la recolección

2.3. Caracterización del agua residual

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se cuantificará conforme al método de tubo sellado a pequeña escala (parte 1: reflujo abierto) establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021. En situaciones donde la concentración de cloruros supere los 1000 mg/L, se utilizará como sustituto el Carbono Orgánico Total (COT), conforme a lo previsto en la misma norma.

Aunque los Sólidos Suspendidos Totales (SST) no están formalmente regulados en esta versión de la NOM, pueden medirse como parámetro complementario usando el método gravimétrico oficial (p.e., NMX-AA-034-SCFI-2015) cuando sea necesario.[9]

2.4. Diseño de la biocelda

La biocelda de combustible de doble cámara utiliza una membrana de intercambio protónico (Nafion) de amplia superficie para separar los compartimentos. La cámara anódica contiene una comunidad bacteriana proveniente de lodos activados de plantas de tratamiento municipales, responsable de la oxidación de materia orgánica. La cámara catódica aloja el consorcio de microalgas inmovilizado en electrodos de grafito, donde genera bioH₂ mediante reducción foto-asistida de protones.

3. Resultados esperados

3.1 Eficiencia en Remoción de CE

Se proyecta evaluar la capacidad del sistema para remover un espectro de contaminantes emergentes representativos (por definir en la fase experimental), cuantificando porcentajes de remoción específicos mediante técnicas analíticas validadas. La eficacia se atribuirá a mecanismos combinados de biotransformación enzimática y bioadsorción mediados por el consorcio de microalgas, con énfasis en la correlación entre parámetros operativos y eficiencia de remoción [5].

3.2 Producción de Biohidrógeno

Por el estudio bibliométrico realizado se proyectan los siguientes resultados para la producción de biohidrógeno:

- Tasa de producción: Investigaciones con *Chlorella vulgaris* expuesta a iluminación morada han registrado tasas de generación de H₂ entre 1.8 y 23.1 mL H₂/L·día en bioceldas, bajo una intensidad lumínica de 140 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$. Estas condiciones favorecen al máximo la fotosíntesis y la transferencia de electrones hacia la reducción de protones.[10]
- Eficiencia energética: Se proyecta una eficiencia coulombica de 22–30%, atribuida a la capacidad del consorcio microalgal para ceder electrones al circuito electroquímico. Dicha eficiencia puede incrementarse ajustando el pH a 7.5–8.0 y empleando electrodos de grafito modificados, lo que minimiza las pérdidas energéticas. [12]
- Sinergia bacterias-microalgas: La integración del consorcio de microalgas en el catodo incrementara la producción de H₂.

4. CONCLUSIONES

Se proyecta que este trabajo demostrará la eficacia superior de los consorcios de microalgas en sistemas biohíbridos, alcanzando remociones esperadas del 70-80% para





contaminantes emergentes en condiciones reales de operación. Esta eficiencia se atribuirá al mecanismo dual sinérgico documentado experimentalmente: la oxidación bacteriana de materia orgánica en el ánodo liberará electrones que, combinados con la actividad fotosintética de las microalgas en el cátodo, facilitarán simultáneamente la degradación enzimática de contaminantes mediante las casas y la generación de biohidrógeno con eficiencias coulombica del 25-30%. Este proceso integrado reducirá los costos energéticos en un 60% comparado con tecnologías convencionales.

En aplicaciones prácticas, se anticipa que esta tecnología ofrecerá soluciones viables para problemas ambientales críticos de México, incluyendo la remediación de cuerpos de agua altamente contaminados como el río Lerma (con concentraciones de diclofenaco que exceden 500 veces los límites seguros) y la generación descentralizada de energía en plantas municipales. Proyecciones indican que sistemas a escala piloto (100 m³/día) podrían cubrir el 15% de la demanda eléctrica mediante producción de bioH₂, alineándose con los objetivos de la Ley General de Economía Circular.

Para superar barreras de implementación, se proponen tres líneas estratégicas de trabajo futuro: el desarrollo de normativas mexicanas específicas para contaminantes emergentes, incorporando hallazgos en la revisión 2026 de la NOM-001-SEMARNAT; la validación del sistema en la planta de tratamiento de Iztapalapa mediante integración con digestores anaerobios para aumentar la recuperación energética en un 40%; y la optimización de la biomasa residual para producción de bioplásticos mediante bioingeniería de cepas, incrementando rendimientos a >30% peso/peso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos SIP: 20241116 y 20254500 del Instituto Politécnico Nacional. El autor Jorge Alberto Acosta Piña agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI) por la beca de maestría otorgada.

REFERENCIAS

- [1] I. Vázquez-Tapia et al., "Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in

different water compartments in Mexico – A review," *Chemosphere*, vol. 308, p. 136285, Dec. 2022, doi:

10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.136285.

- [2] Á. Martínez-Organiz et al., "Emerging pollutants and antibiotics removed by conventional activated sludge followed by ultraviolet radiation in a municipal wastewater treatment plant in Mexico," *Water Quality Research Journal*, vol. 56, no. 3, pp. 167–179, 2021, doi: 10.2166/WQRJ.2021.013/921454/WQRJ2021013.PDF.
- [3] S. Mehariya et al., "Microalgae: A potential bioagent for treatment of emerging contaminants from domestic wastewater," *Chemosphere*, vol. 351, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.141245,.
- [4] "Contaminantes emergentes » Avance y Perspectiva." Accessed: Aug. 11, 2025. [Online]. Available: https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/contaminantes-emergentes/?utm_source=chatgpt.com
- [5] D. Jacobo-Marín and G. S. de León, "Emerging contaminants in water: Regulation in Mexico, precautionary principle and comparative perspective," *Revista de Derecho Ambiental(Chile)*, vol. 15, pp. 51–75, Jun. 2021, doi: 10.5354/0719-4633.2021.57414.
- [6] "DOF - Diario Oficial de la Federación." Accessed: Aug. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- [7] A. Torres, H. A. Rodríguez, and M. Ayala, "Contaminantes emergentes en México: panorama actual, retos y una posible solución biotecnológica," *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, vol. 26, Oct. 2024, doi: 10.22201/FESZ.23958723E.2023.590.
- [8] "NMX-AA-003-1980 – Normalización." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-aa-003-1980/>
- [9] "NMX-AA-034-SCFI-2015 – Normalización." Accessed: Aug. 13, 2025. [Online]. Available: <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-aa-034-scfi-2015/>
- [10] A. Ruiz-Marin, Y. Canedo-López, and P. Chávez-Fuentes, "Biohydrogen production by *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* immobilized cultivated in artificial wastewater under different





- light quality,” AMB Express, vol. 10, no. 1, p. 191, Dec. 2020, doi: 10.1186/S13568-020-01129-W.
- [11] “Bio-electrochemically assisted microbial reactor that generates hydrogen gas and methods of generating hydrogen gas,” Jul. 2005.
- [12] E. Eroglu and A. Melis, “Microalgal hydrogen production research,” Int J Hydrogen Energy, vol. 41, no. 30, pp. 12772–12798, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2016.05.115.

Jorge Alberto Acosta Piña. El Ingeniero Jorge Alberto Acosta Piña está adscrito actualmente al Centro Mexicano de Producción más Limpia del Instituto Politécnico Nacional (IPN), con sede en la Ciudad de México, México. Es de nacionalidad mexicana y radica en la misma ciudad. Obtuvo el título de Ingeniero Químico Industrial en el Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, en el año 2023. Actualmente cursa la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental en el Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, con fecha estimada de conclusión en 2026. Su área principal de investigación se centra en el desarrollo y evaluación de procesos biohíbridos para la remoción de contaminantes emergentes y la generación de hidrógeno. Su trabajo integra el uso de celdas bioelectroquímicas con microalgas, procesos de oxidación avanzada y técnicas de coagulación electroquímica, con el objetivo de optimizar la eficiencia energética y la sustentabilidad en el tratamiento de aguas residuales.





Celdas solares de Perovskita fabricadas por dispersión por barra en condiciones ambientales usando disolventes de vaporización alta

CARLOS FABIÁN ARIAS-RAMOS*, FRANCISCO ENRIQUE CANCINO-GORDILLO,
ASIEL N. CORPUS-MENDOZA, HAILIN HU

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, 62580, México

Autor de Correspondencia: Carlos Fabián Arias-Ramos (e-mail: cafaar@ier.unam.mx).

CFAR y FECG agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), México, por la beca postdoctoral (CVU # 709010 y # 784149), ANCM agradece el apoyo de SECIHTI bajo el programa de Investigadores por México, proyecto 7193. Se agradece el apoyo financiero de PAPIIT-UNAM (IA102625) y SECIHTI (CF-2023-I-725), así como la infraestructura proporcionada por Laboratorios Nacionales de SECIHTI (APOYOS LNC 2023-33 Innovación y Desarrollo de prototipos de módulos fotovoltaicos con celdas solares experimentales LIFYCS-IER-UNAM).

RESUMEN Las celdas solares a base de perovskita híbrida (CPH) son una tecnología muy prometedora que hoy en día ha permitido formar dispositivos de hasta 26.95 % de eficiencia de conversión de carga (ECC) en celdas de área chica (0.058cm^2)[1], y de hasta 21.1 % en pequeños módulos ($800\text{-}6500\text{ cm}^2$)[2]. Sin embargo, la fabricación de películas delgadas de perovskita de área grande, a gran escala y sin la necesidad de un ambiente controlado (cámara de guantes) continúa siendo un desafío que frena las posibilidades de comercialización de este tipo de tecnología. Esto ha impulsado el desarrollo de diversas tecnologías que buscan el escalamiento de las CPH, donde las más cercanas a métodos industriales carecen de mecanismos de control directos del proceso de cristalización de la perovskita. Mismos que han podido ser subsanados a partir de la mezcla de dos o más disolventes de menor punto de ebullición (PE) y mayor presión de vaporización (PV), mejor conocidos como disolventes de vaporización alta. Existiendo pocos estudios realizados en condiciones de alta humedad relativa ($> 40\%$) por un método escalable de fabricación de la perovskita a partir de disolventes de menor PE ($< 130\text{ }^\circ\text{C}$). Por tal motivo, en este trabajo se muestra el uso de un sistema de disolventes de vaporización alta para la fabricación de celdas solares de perovskita MAPbI_3 a partir de la técnica escalable de dispersión por barra o *D-Bar-Coating* (DBr) en condiciones ambientales. Esta adaptación nos ha permitido

producir dispositivos de 0.104cm^2 por encima del 11% de ECC bajo condiciones de humedad (40-50%) y temperatura ambiente ($25\text{-}26^\circ\text{C}$), con la reducción del volumen de disolventes necesarios para la fabricación. Como resultado, se simplifica el proceso de fabricación y se elimina la necesidad de una cámara de guantes.

PALABRAS CLAVE: Celdas de Perovskita, Dispersión por Barra, Método de Escala Industrial, Disolventes de Vaporización alta, Condiciones Ambientales.

1. Introducción

El avance que han mostrado las CPH de 3.8% al casi 27% de ECC en un tiempo relativamente corto se debe a las excelentes propiedades optoelectrónicas y alta tolerancia a los defectos de las películas delgadas de las perovskitas híbridas, además de la abundancia de los materiales que las componen y su facilidad para ser depositadas a partir de una amplia gama de técnicas [3]. Sin embargo, los mejores resultados se han obtenido en celdas de área chica ($< 0.1\text{ cm}^2$) y en atmósferas controladas (N_2) a partir de técnicas de escala laboratorio [3], entre las cuales destaca la de dispersión por rotación (*spin-coating*) que, a pesar de ser una técnica de depósito práctica, limita el escalamiento de las



películas de perovskita [4], además de ser incompatible con procesos y costos a nivel industrial [4].

Actualmente, se han empleado diversas metodologías para la fabricación de películas delgadas de perovskita de área grande, entre las que se encuentra el depósito por cuchilla de dispersión o *Doctor-blade* (DB). El DB junto con su variante de dispersión por barra o *D-Bar-coating* (DBr), es la metodología de depósito más próxima a técnicas industriales, como la técnica de *roll-to-roll* [5].

La transición de métodos de fabricación de películas de perovskita en escala de laboratorio a métodos industriales como DBr implica la adaptación de las variables de control de la cinética de cristalización de la solución precursora [5], factor clave para obtener una CPH de alta eficiencia. A diferencia del método de depósito por rotación (Figura 1a), en DBr (Figura 1b) se carece de las fuerzas centrífugas y el anti-disolvente como mecanismos de control de la velocidad de cambio de estado líquido a cristalino de la solución de perovskita. Por lo tanto, se depende de otros factores como el sistema de disolventes de la solución precursora para inducir su sobresaturación, y con ello, controlar el crecimiento de granos y cristal [6].

El disolvente más reportado para la solución precursora de perovskita es la Dimetilformamida (DMF), el cual tiene una gran capacidad de solvatación, pero posee un punto de ebullición (PE) relativamente alto de 153 °C y una presión de vapor relativamente baja de 350 Pa a 20 °C, haciéndola viable sólo en sistemas de DBr con una alta temperatura de plancha o pre-calentamiento (> 120 °C) [7], [8]. En atención a ello, se han utilizado disolventes de un punto de ebullición menor a 130 °C y presión de vapor (PV) mayor a 500 Pa a 20 °C, mejor conocidos como disolventes de vaporización alta [6]. De manera exitosa se ha podido utilizar al 2-Metoxietanol (2ME) en conjunto con acetonitrilo (ACN) como sistema de disolventes de vaporización alta para la fabricación de CPH de hasta 21.16 % de eficiencia de conversión de carga (ECC) en áreas de iluminación de 0.09 cm² [6], por la metodología de fabricación de DB en atmósferas controladas o de baja humedad. Siendo pocos los trabajos donde se integran la fabricación por DBr para la fabricación de ECC a partir de disolventes de menor PE (< 130 °C) en condiciones de alta humedad relativa (> 40 %)

Por ello, en este trabajo se estudia el efecto de implementar un sistema de disolventes de vaporización alta en las propiedades optoelectrónicas de películas delgadas de perovskita híbrida (tri-yoduro de plomo metilamonio, MAPbI₃) fabricadas por la metodología de DBr bajo condiciones de alta humedad (> 40 %), así como su influencia en las propiedades eléctricas de los dispositivos fotovoltaicos donde son aplicadas.

2. Metodología

2.1. Fabricación de Películas de MAPbI₃

La solución de perovskita compuesta por MAI y PbI₂ en una relación molar 1:1, fue disuelta en 2-Metoxietanol (2ME), acetonitrilo (ACN) y 2-N-Metil-Pirrolidona (NMP) en diferentes volúmenes de estudio descritas en secciones posteriores (3.1 y 3.2). La solución final es agitada a 650 rpm sin temperatura durante 24h previo a su uso.

Las películas de perovskita fueron depositadas bajo condiciones de humedad ambiental (30-60 %) y temperatura (24-25 °C), empleando la metodología de DBr, como se muestra en la Figura 1b. El depósito se realizó utilizando una barra 5 µm de brecha, a una velocidad de 20 mm/s, con una temperatura de plancha de 30 °C y utilizando una cuchilla de nitrógeno con un ángulo de 60 ° a 25 psi.



FIGURA 1. Diagrama del proceso de a) depósito por rotación (Spin-Coating) y b) depósito por barra (DBr) para la fabricación de películas de perovskita.

2.2. Caracterización de material y dispositivo

La interacción de las películas de perovskita con la luz fue determinada a partir de la absorbancia (*A*), reflectancia especular (*R*) y transmitancia (*T*) óptica, medidas en un espectrofotómetro (Shimadzu UV-1800) en el rango de longitud de onda de 300 a 1000 nm a velocidad media con un intervalo de 2.0 nm. Los espesores (*d*) y perfiles de las películas fueron obtenidos en el perfilómetro (Ambios Technology XP-200 Sylus). A partir de los perfiles se estimó



la rugosidad superficial (R_a) [9] para determinar las irregularidades de la superficie, como afectan el funcionamiento de la película de perovskita y su interacción con otras capas, conforme a la ecuación 1:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x) - m| dx, \quad (1)$$

donde L es la longitud de muestreo del perfil, $z(x)$ es el perfil superficial en función de la distancia x , y m es la línea central o la línea media, obtenida a partir de la ecuación 2:

$$m = \frac{1}{L} \int_0^L z(x) dx. \quad (2)$$

La capacidad de absorción de la luz de las películas, que influye en su ECC final, fue determinada por el coeficiente de absorción óptica (α) de acuerdo con la ecuación 3:

$$\alpha = \frac{-1}{d} \ln \left(\frac{-(1-R)^2 + \sqrt{1-R^2 + 4T^2R^2}}{2TR^2} \right). \quad (3)$$

La cuantificación del desorden estructural (defectos, impurezas y variaciones de la red cristalina) que afectan las propiedades ópticas y eléctricas finales de las películas de perovskita se estimó a partir de la Energía de Urbach (E_u), mostrada en la ecuación 4:

$$\alpha = \alpha_0 e^{\left(\frac{hv}{E_u}\right)}, \quad (4)$$

donde α_0 es una constante, hv es la energía del fotón y E_u es obtenida a partir del inverso de la pendiente de la región lineal de los gráficos $\ln(\alpha)$ contra la energía del fotón. La morfología superficial de las películas delgadas de perovskita fue estudiada utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) de alta resolución (Hitachi FE-5500) a un voltaje de 5 kV.

Las curvas de la Densidad de Corriente contra Voltaje ($J-V$) de las celdas bajo iluminación fueron medidas en el simulador solar Oriel LCS-100 bajo un estándar de iluminación AM 1.5G, con un adquisidor de datos Keithley 2400 SourceMeter. La intensidad de la luz fue calibrada con una celda de referencia de Si (Newport) para alcanzar una irradiancia de 100 mW/cm². El área activa de iluminación de cada celda fue de 0.104 cm², en una dirección de medición en reversa de 1.1 a 0.1 V.

3. Resultados

3.1. Variación de Disolventes de Vaporización Alta de Coordinación Baja (DCBVA) e Intermedia (DCIVA).

En la solución de perovskita, la disolución ocurre debido a la interacción entre el precursor y el disolvente, similar a una relación entre un ácido y una base según la teoría de Lewis [8]. Esto se debe a que el ion Pb^{2+} (Acido de Lewis) se une fácilmente con grupos que tienen electrones disponibles (Base de Lewis) del disolvente. Esta unión forma un compuesto intermedio mediante un enlace covalente, como sucede comúnmente en las interacciones en muchos compuestos organometálicos [10]. Haciendo que, los disolventes que puedan ser empleados en la solución precursora deban tener una alta basicidad de Lewis en la reacción. Una de las formas de cuantificar la basicidad de Lewis está determinada por el Número de Donadores de Gutmann's (ND) [11]. Tomando el ND como una medida de la capacidad de solvatación de un ácido de Lewis [11] y el punto de ebullición para determinar la temperatura de cambio de estado líquido a gaseado, se elaboró una gráfica comparativa (Figura 2) para determinar el nivel de interacción y su capacidad de evaporación de diferentes disolventes. Quedando divididos en: (1) disolventes de coordinación baja de vaporización alta (DCBVA), tales como acetona, acetano de etilo (AE), acetonitrilo (ACN), hexano; (2) disolventes de coordinación intermedia de vaporización alta (DCIVA), como agua, 2ME, tolueno y clorobenceno (CB), y (3) disolventes de coordinación alta de vaporización baja (DCAVB), como DMF, DMSO, NMP, Gamma-Butirolactona (GBL).

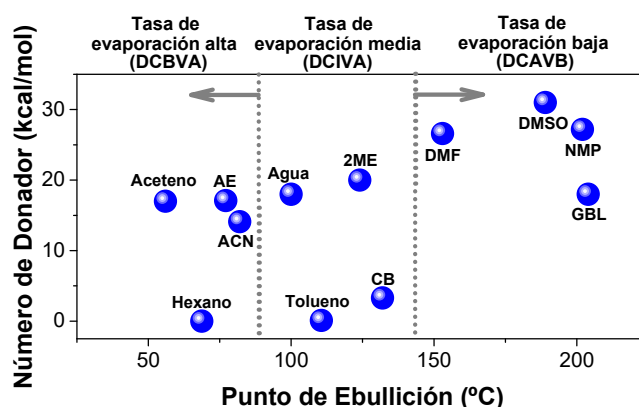


Figura 2. Gráfica del número de donadores-Punto de ebullición de diferentes disolvente: Acetona, Hexano, Acetato de etilo (AE), Acetonitrilo (ACN), Agua, Tolueno, 2-Metoxietanol (2ME), Clorobenceno (CB), Dimetilformamida (DMF), Dimetilsulfóxido (DMSO), N-Metil-2-Pirrolidona (NMP) y Gamma-Butirolactona (GBL).

El 2ME con un PE de 124 °C cercano al del DMF (153 °C), aparenta no ser un candidato idóneo para inducir una



evaporación espontánea. Sin embargo, al mezclarlo con ACN se consigue aumentar su evaporación debido al menor PE que posee (82°C). Al variar el volumen del ACN en la solución precursora con 2ME, se obtienen tres escenarios: evaporación de disolventes alta (HER), media (MER) y baja (LER), donde la HER se logra con una relación en volumen del 2ME con ACN de 50:50, la MER de 70:30 y la LER de 90:10. Se observa que el cambio en la proporción de disolventes tiene un efecto directo en la morfología de la película de perovskita, como se muestra en las micrografías SEM de las películas en la Figura 3. Los tres escenarios de evaporación de disolventes de coordinación baja e intermedia forman granos de perovskita, no obstante, en el caso HER se observan huecos en la superficie como resultado de la formación acelerada de los granos, impidiendo su compactamiento. Por otro lado, la evaporación de disolventes intermedia (MER) permite un crecimiento más controlado y paulatino, evitando la formación de huecos entre granos. En el caso de la baja evaporación de disolventes (LER) se forma una superficie compacta con un promedio mayor de tamaño de grano (260.4 nm), en comparación con el caso de MER (195 nm), por una cinética de formación de perovskita más lenta.

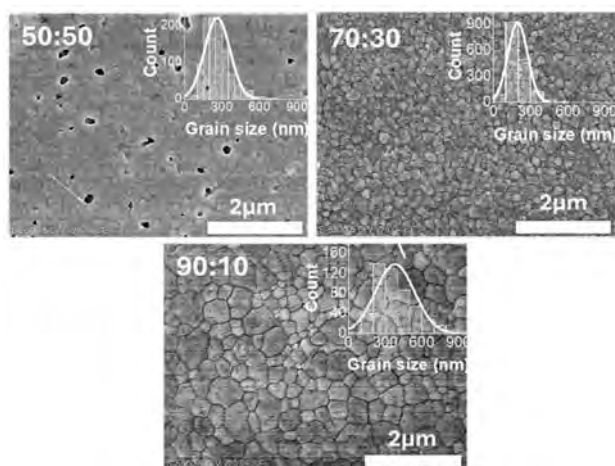


FIGURA 3. Imágenes de SEM de las películas de perovskita preparadas a partir de un sistema de disolventes de vaporización alta (HER, 2ME:ACN = 50:50), media (MER, 2ME:ACN = 70:30) y baja (LER, 2ME:ACN = 90:10) con $5\text{ }\mu\text{L}$ de NMP en cada caso.

La medición de absorbancia normalizada con el espesor de las películas (Figura 4a), muestra cambios en la intensidad de las curvas obtenidas en el rango de longitud de onda de 300-500 nm como resultado de la proporción de solventes usada. Este desplazamiento tiene su correlación con la compactamiento de la película, siendo la muestra 50:50 la de menor intensidad por la presencia de los huecos en la superficie (Figura 3), mientras que la absorbancia aumenta conforme la proporción de ACN disminuye (muestras 70:30 y

90:10), debido al incremento del tamaño de los granos y a que el ordenamiento compacto obtenido disminuye la rugosidad superficial (R_a), como se muestra en la Figura 4b. La estimación de la E_u , como parámetro para cuantificar el desorden energético en los bordes de banda de las películas[12] (Figura 4b), mostró una reducción conforme el volumen de 2ME aumenta en la solución precursora. Esta reducción de E_u va en correlación con el aumento de la absorbancia de las películas, así como en la reducción de su rugosidad debido a una mejor formación de los granos en la superficie. Los resultados obtenidos evidencian la mejora en las propiedades ópticas y morfológicas de las películas de perovskita por la disminución de la evaporación de los disolventes como mecanismo para reducir la cantidad de defectos superficiales, esto se espera que impacte de manera positiva en los parámetros eléctricos de las celdas solares hechas con estas películas.

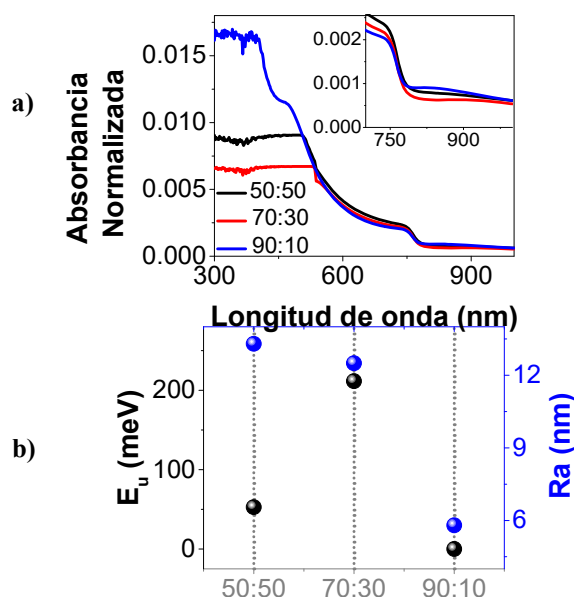


FIGURA 4. a) Absorbancia Normalizada, b) Energía de Urbach (E_u) y Rugosidad promedio (R_a) de las películas de perovskita con variaciones de la relación en volumen del 2ME:ACN en: 50:50, 70:30 y 90:10 en las soluciones precursoras de perovskita.

3.2. Variación de Disolventes de Vaporización Baja de Coordinación Alta (DCAVB).

En la literatura se mencionan que el proceso de nucleación y crecimiento de cristal en la solución de perovskita debe ocurrir en un tiempo relativamente corto entre la concentración de saturación (C_s) y la concentración crítica (C_c) de la solución para promover la formación de núcleos a lo largo de toda la superficie de recubrimiento [6]. Una vez alcanzada la C_c , el

tiempo transcurrido hasta el agotamiento del soluto debe ser mayor para fomentar el crecimiento de los núcleos y cristales de perovskita. Estos dos tiempos distintos de evaporación se logran a partir de incorporar un disolvente de coordinación alta y vaporización baja (DCAVB), con la capacidad de formar una fase intermedia estable con el precursor, después de la eliminación del disolvente de bajo punto de ebullición (DCBVA y DCIVA, tales como ACN y 2-ME, respectivamente), lo que tiene como resultado una morfología con menos estados trampa.

El DCAVB más comúnmente empleado es el Dimetilsulfóxido (DMSO) [8]. El DMSO al ser aplicado en un sistema de disolventes de alta vaporización, como es el caso de 2ME y el ACN, el volumen que se puede agregar a la solución precursora es muy limitado. Este último se debe al ND tan alto que presenta el DMSO (31 kcal/mol), favoreciéndose la coordinación de este con el soluto, formando otro compuesto [13]. En atención a ello se ha utilizado el N-Metil-2-Pirrolidona (NMP) como disolvente y agente de coordinación [14], con un ND de 27.2 kcal/mol que permite incorporar un mayor volumen en la solución precursora para ampliar el espectro de control de la cinética de cristalización.

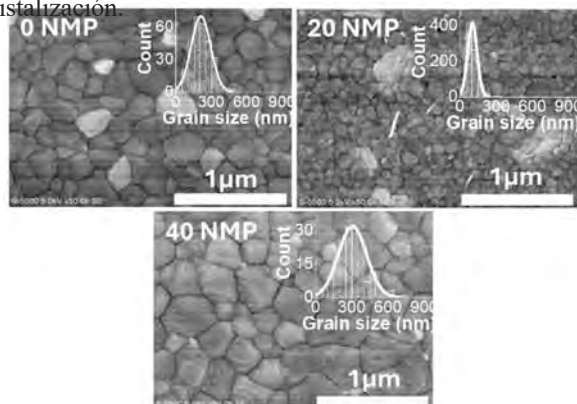


FIGURA 5. Micrografías SEM de las películas de perovskita preparadas con 0, 20 y 40 $\mu\text{L/mL}$ NMP en las soluciones precursoras de perovskita.

El análisis de la morfología superficial de las películas de perovskita fabricadas por DBr en ambiente, con variaciones de NMP de 0, 20 y 40 $\mu\text{L/mL}$ en la solución precursora se muestra en la Figura 5, donde las películas de perovskita formadas sin DCAVB (0 NMP) producen granos de 211 nm de diámetro en promedio, ya que sólo cuenta con 2ME y ACN como único mecanismo de control de la de evaporación de disolventes, permitiendo que el grano crezca de manera descontrolada. A medida que se incorpora NMP se observa una reducción del tamaño de grano a 102 nm en las muestras con 20 μL de NMP por mililitro de solución, en la que también se forman otras morfologías como fibras y hojuelas probablemente por la distribución del NMP tan poco uniforme

en la superficie que induce a la creación de cúmulos de crecimiento más lento y otras de crecimiento acelerado. Cuando el volumen de NMP es de 40 μL el tamaño de grano incrementa a 306 nm, sin la presencia de la formación de otras morfologías y con una superficie muy compacta.

La Figura 6a muestra curvas de absorbancia normalizada de las películas de perovskita, para las condiciones de 20 y 40 μL de NMP. La diferencia principal radica en la posición de inicio de la curva (800-1000 nm) que exhibe una mayor separación de la línea basal en la muestra con 20 μL de NMP, en comparación con la muestra a 40 μL de NMP. Esta separación está asociada con fenómenos de dispersión de luz [15] como resultado de un aumento en la rugosidad de la muestra, mismo que pudo ser comprobado a partir de la R_a de la película (Figura 6b), que es de 41.2 nm, en comparación con la muestra con 40 μL de NMP que tiene un valor de R_a de 14.4 nm (ver la Figura 6b). Por otra parte, la E_u de las muestras con NMP en la solución precursora (Figura 6b) exhibe una reducción conforme la proporción de NMP aumenta, indicativo de la disminución de defectos estructurales al aumentar el tiempo de cristalización.

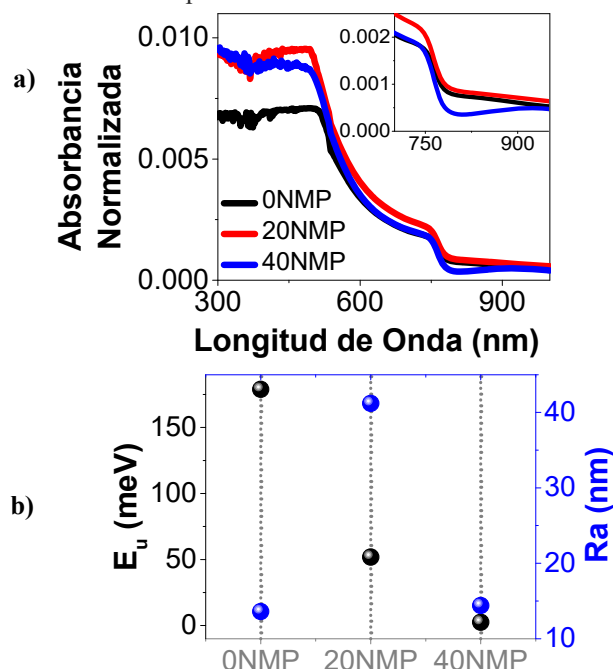


FIGURA 6. a) Absorbancia Normalizada, b) medición de perfilometría, y c) E_u de las películas de MAPbI_3 con variaciones de volumen de NMP en 0 μL , 20 μL y 40 μL , fabricadas por D-Bar-Coating en ambiente a partir de relación en volumen de 2ME:ACN en 70:30.

3.3. Celdas Solares de Perovskita (CPH) con DCBVA, DCIVA y DCAVB optimizados.



En una comparativa de resultados, se realizaron mediciones de los parámetros fotovoltaicos de las CPH. Estas se dividen en dos grupos: el primer grupo fueron preparadas a partir de las películas con variaciones en porcentaje en volumen (%v) del 2ME:ACN como DCBVA:DCIVA = 50:50 (columnas negras en la Figura 7) y 70:30 (columna roja en la Figura 7), con una cantidad fija de NMP (5 μ L). En ellas se observa un aumento de la ECC promedio de 4.2% a 4.4% conforme la proporción de 2ME aumenta en la solución de perovskita, producto de la mejora en la formación de granos y su compactamiento (Figura 2).

Las celdas solares del segundo grupo, fueron preparadas fijando el %v de 2ME:ACN en 70:30 con variación de la concentración de NMP como DCAVB: muestras 20 NMP (columnas azules en la Figura 7) y 40 NMP (columnas rosas en la Figura 7). El aumento de la ECC se ve potenciado a medida que se incrementa el volumen de NMP en la solución precursora, mostrando una relación inversa a E_u (Figura 6c), hasta lograr valores máximos de $V_{OC} = 0.92$ V, $J_{SC} = 18.9$ mA/cm², un Factor de Forma de 69.8 %, ECC = 11.85 % en los dispositivos de 40NMP. Estos resultados demuestran que es posible utilizar un sistema de disolventes de vaporización alta para la fabricación de películas delgadas de perovskita, eliminándose el uso de un anti-disolvente que llega a representar hasta el 90 % del total de los disolventes utilizados para fabricar CPH.

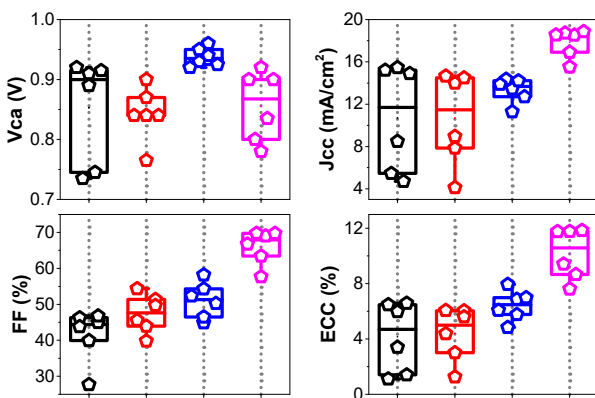


FIGURA 4. Concentración de NMP y sus parámetros eléctricos en las celdas de solares de perovskita-MAPbI₃ fabricadas por D-Bar-Coating en ambiente con variación de 2ME:AC (50:50 y 70:30 y 90:10) y NMP (20 y 40 μ L/mL). V_{OC} (Voltaje a Circuito Abierto), J_{SC} (Densidad de Corriente de Corto Circuito), FF (Factor de Forma) y ECC (Eficiencia de Conversión de Carga)

4. CONCLUSIONES

La formación de una película de perovskita depende de la evaporación en fases y de la coordinación con el soluto del

sistema de disolventes. En la metodología de D-Bar-Coating es posible secuenciar la evaporación y regular el nivel de coordinación a partir de un sistema de disolventes de vaporización alta con coordinación baja, media e intermedia como lo son el acetonitrilo (ACN), el 2-Metoxietanol (2ME), y el 2-N-Metil-Pirrolidona (NMP), respectivamente. El ACN induce a la evaporación casi espontánea de la solución precursora gracias a su punto de ebullición (PE) de 82 °C, mientras que el 2ME y el NMP la retardan. Por otro lado, el NMP con número de donador (ND) de 27.2 kcal/mol y PE de 202 °C, cercanos al del DMSO, es un candidato idóneo para retardar la evaporación después de haberse alcanzado la saturación crítica de la solución de perovskita, induciendo el crecimiento de núcleos y cristales en un tiempo más adecuado, lo que permite formar una película de granos más grandes, compactos y homogéneos a lo largo de toda la superficie. La optimización de la mezcla de 2ME:ACN en un porcentaje volumétrico (%v) de 70:30 junto con 40 μ L/mL de NMP permite fabricar celdas a base de perovskita híbrida bajo condiciones de alta humedad (> 40 %) y temperatura ambiente (25 °C), de casi 12 % de eficiencia de conversión de carga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico de Rogelio Morán Elvira por SEM.

REFERENCIAS

- [1] “Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL.” Accessed: Jun. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>
- [2] “Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL.” Accessed: Jul. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency>
- [3] G. B. Adugna and Y. T. Tao, “Perovskite solar cell fabrication via scalable thermal-assisted and meniscus-guided bar-coating method in open air,” *Journal of the Chinese Chemical Society*, vol. 70, no. 12, pp. 2226–2237, Dec. 2023, doi: 10.1002/jccs.202300190.
- [4] E. Rezaee, D. Kutsarov, B. Li, J. Bi, and S. R. P. Silva, “A route towards the fabrication of large-scale and high-quality perovskite films for optoelectronic devices,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10790-z.





- [5] G. B. Adugna and Y. T. Tao, "Perovskite solar cell fabrication via scalable thermal-assisted and meniscus-guided bar-coating method in open air," *Journal of the Chinese Chemical Society*, vol. 70, no. 12, pp. 2226–2237, Dec. 2023, doi: 10.1002/jccs.202300190.
- [6] C. Wu et al., "Volatile solution: the way toward scalable fabrication of perovskite solar cells?," *Mar. 03, 2021*, Cell Press. doi: 10.1016/j.matt.2020.12.025.
- [7] Y. Zhong et al., "Blade-Coated Hybrid Perovskite Solar Cells with Efficiency > 17%: An In Situ Investigation," *ACS Energy Lett*, vol. 3, no. 5, pp. 1078–1085, May 2018, doi: 10.1021/acsenergylett.8b00428.
- [8] J. Li et al., "Phase Transition Control for High-Performance Blade-Coated Perovskite Solar Cells," *Joule*, vol. 2, no. 7, pp. 1313–1330, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.04.011.
- [9] Bharat Bhushan, "Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques," in *Modern Tribology Handbook*, vol. 1, CRC Press, 2001.
- [10] M. Du et al., "High-Pressure Nitrogen-Extraction and Effective Passivation to Attain Highest Large-Area Perovskite Solar Module Efficiency," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 47, Nov. 2020, doi: 10.1002/adma.202004979.
- [11] A. J. Doolin et al., "Sustainable solvent selection for the manufacture of methylammonium lead triiodide (MAPbI₃) perovskite solar cells," *Green Chemistry*, vol. 23, no. 6, pp. 2471–2486, Mar. 2021, doi: 10.1039/d1gc00079a.
- [12] N. J. Podraza et al., "Urbach energy and open-circuit voltage deficit for mixed anion– cation perovskite solar cells," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 14, no. 6, pp. 7796–7804, Feb. 2022, doi: 10.1021/acsami.1c19122.
- [13] Y. Chen, M. Zhang, F. Li, and Z. Yang, "Recent Progress in Perovskite Solar Cells: Status and Future," *Mar. 01, 2023*, MDPI. doi: 10.3390/coatings13030644.
- [14] X. Huang et al., "Solvent Gaming Chemistry to Control the Quality of Halide Perovskite Thin Films for Photovoltaics," *ACS Cent Sci*, vol. 8, no. 7, pp. 1008–1016, Jul. 2022, doi: 10.1021/acscentsci.2c00385.
- [15] S. Haque et al., "Photon shifting and trapping in perovskite solar cells for improved efficiency and stability," *Light Sci Appl*, vol. 13, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41377-024-01559-2.





Análisis de diseños recientes de redes de intercambio de calor para el caso de estudio 9SP

AXEL A. GASPAR-CANIZALES, JUAN M. ZAMORA-MATA

Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, CDMX, 09310, México

Autor de Correspondencia: Juan M. Zamora-Mata (e-mail: jmzm@xanum.uam.mx).

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Síntesis, Optimización y Simulación de Procesos (S.O.S.)

RESUMEN Las redes de intercambio de calor permiten incrementar la eficiencia energética de los sistemas de proceso y reducir los impactos ambientales. Por consiguiente, la síntesis, análisis y optimización de redes de intercambio de calor son piezas clave para el desarrollo de diseños sustentables. Este trabajo aborda el análisis técnico y económico de dos diseños propuestos recientemente en la literatura para el caso de estudio 9SP; el cual es ampliamente utilizado como caso de referencia en la evaluación de metodologías de síntesis de redes de intercambio de calor. Se presenta un cuadro comparativo de diseños recientes para el problema 9SP, con sus principales características operativas y costo total anual (CTA) asociado; resaltando dos diseños que reportan los menores CTA alcanzados hasta el día de hoy en publicaciones de la literatura. Se realiza el análisis técnico y económico de dichos diseños, utilizando una metodología secuencial que incluye 7 pasos. Como resultado, se obtuvieron valores revisados de cargas térmicas, temperaturas intermedias, fracciones de división, áreas de intercambio de calor y CTA. Se concluye que los dos diseños analizados son viables, pero presentan discrepancias en términos de su CTA reportado.

PALABRAS CLAVE: Integración térmica, Redes de intercambio de calor, Eficiencia energética, Diseño y análisis.

1. INTRODUCCIÓN

La integración térmica de sistemas de proceso es un área clave para incrementar la eficiencia energética, reducir el consumo de servicios auxiliares y minimizar el impacto ambiental de los sistemas de producción. A través del diseño adecuado de redes de intercambio de calor, es posible

recuperar parte del calor disponible entre corrientes de proceso, reduciendo así el uso de servicio auxiliares.

En las últimas décadas, se han desarrollado múltiples metodologías para la síntesis de redes de intercambio de calor, las cuales pueden clasificarse en dos enfoques principales: metodologías secuenciales y metodologías simultáneas [1]. El objetivo consiste en desarrollar diseños de red eficientes que minimicen el costo total anual (CTA), al balancear costos de inversión y operación. Las metodologías secuenciales, como la propuesta por Linnhoff y Hindmarsh [2], dividen el problema en diferentes etapas, lo que permite desarrollar soluciones más estructuradas y comprensibles para el diseño. Sin embargo, aunque esta metodología proporciona una buena base para orientar el diseño de una red de intercambio de calor, no garantiza la obtención de un diseño con el menor CTA. Por otro lado, las metodologías simultáneas abordan el problema como un todo, mediante modelos matemáticos que consideran de manera conjunta los balances de energía, las restricciones de diseño en equipos y los costos económicos, lo que permite determinar soluciones mayormente eficientes desde el punto de vista técnico y económico, aunque a costa de una mayor complejidad computacional. Desde su introducción por Linnhoff y Ahmad [3], el caso de estudio 9SP se ha convertido en un referente clásico para evaluar metodologías de síntesis de redes de intercambio de calor; debido a la complejidad estructural dada por la variedad de corrientes involucradas. Durante más de tres décadas, este problema ha sido empleado como base para validar nuevas propuestas de síntesis, incluyendo modelos de programación no lineal entera-mixta (PNL-EM), algoritmos genéticos, algoritmos deterministas e incluso algoritmos híbridos. En años recientes, estos nuevos métodos han ampliado el espacio de búsqueda del problema de diseño mediante planteamientos más avanzados, dando lugar a redes más complejas y



teóricamente más eficientes. Tal es el caso de los diseños recientemente reportados por Yang y col. [4], para el problema 9SP, que destacan por presentar valores de CTA considerablemente menores a los reportados previamente en la literatura. Sin embargo, estos diseños suelen estar poco documentados en cuanto a su análisis técnico completo, lo que hace necesaria una validación independiente y rigurosa que permita comprobar su consistencia. El análisis de una red de intercambio de calor consiste en evaluar su diseño térmico, su estructura y su CTA reportado, con el objetivo de determinar su viabilidad térmica y económica dentro de un proceso [5]. En este trabajo se revisan los diseños propuestos por Yang y col. [4] mediante una metodología detallada que incluye balances de energía, ecuaciones de diseño y análisis de grados de libertad, con el objetivo de verificar los resultados reportados.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el análisis de redes de intercambio de calor, basada en [5], se desarrolla mediante un conjunto de suposiciones que permiten simplificar el comportamiento de la red y facilitar su análisis. Estas suposiciones son las siguientes:

- Operación en estado estacionario.
- Temperaturas de suministro y objetivo fijas para cada corriente de proceso y servicios auxiliares involucrados.
- Flujos másicos constantes para cada corriente.
- Capacidades caloríficas constantes evaluadas a una temperatura intermedia.
- Las corrientes permanecen en una sola fase.
- Intercambiadores de calor de un solo paso a contracorriente.
- No existen pérdidas de materia o energía al medio ambiente.

Bajo dichas consideraciones, se puede llevar a cabo este análisis de manera ordenada, clara y sistemática. Para ello es necesario considerar los siguientes pasos que se muestran en la Figura 1; los cuales también se describen a continuación:

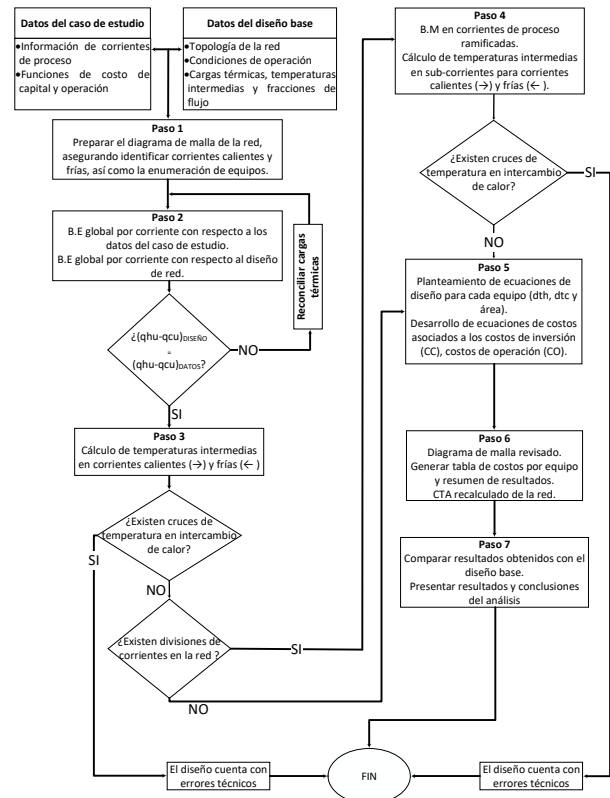


FIGURA 1. Diagrama de flujo de información de la metodología utilizada.

A partir de los datos del problema y propiedades físicas, se definen las corrientes calientes y frías, incluyendo los flujos de capacidad calorífica (F), temperaturas de suministro (TS) y temperaturas objetivo (TO). Con esta información, se representa gráficamente el diseño de red mediante un diagrama de malla que incluye los equipos de intercambio de calor, divisores y mezcladores de corrientes.

Paso 1. Se prepara el diagrama de malla de la red, identificando con claridad todas las corrientes calientes y frías, así como las interconexiones entre los equipos de intercambio de calor.

Paso 2. Se verifica el balance global de energía de la red, comprobando la relación mostrada en (1). También, se realizan los balances globales de energía para cada corriente de proceso, comparando los resultados del diseño de red con las entalpías disponibles y requeridas de acuerdo con los datos originales del problema.

$$(q_{hu} - q_{cu})_{diseño} = (q_{hu} - q_{cu})_{datos} \quad (1)$$



Si los balances concuerdan, se procede al Paso 3. En caso contrario, se reconcilian las cargas térmicas hasta satisfacer los balances globales de energía de cada corriente.

Paso 3. Se calculan las temperaturas intermedias y finales de todas las corrientes calientes y frías de la red, a partir de las cargas térmicas. También, se verifica que los perfiles de temperatura en cada intercambiador de calor no se crucen. Es decir, que en ningún punto la temperatura de la corriente fría supere a la temperatura de la corriente caliente. Si se detectan cruces, se concluye que el diseño analizado presenta inconsistencias técnicas. De lo contrario, se avanza al Paso 4.

Paso 4. En caso de existir divisiones de corrientes, se realizan balances de materia y energía correspondientes para cada ramificación. A partir de ello, se calculan fracciones de flujo, y con base en las cargas térmicas, se recalculan las temperaturas intermedias en cada ramal de las corrientes involucradas. Se verifica nuevamente que no existan cruces de temperatura en los equipos. Si se detectan cruces, el diseño analizado presenta errores técnicos; en caso contrario, se continúa con el análisis de la red.

Paso 5. Se plantean ecuaciones de diseño térmico para cada equipo, incluyendo el cálculo de diferencias de temperaturas en los extremos (dth, dtc) y áreas de intercambio de calor. Asimismo, se desarrollan las expresiones para evaluar los costos de capital (CC) y costos de operación (CO) asociados a cada equipo.

Paso 6. Se elabora el diagrama de malla final revisado, junto con la tabla de costos de la red que incluye el cálculo de CTA revisado.

Paso 7. Se realizan comparaciones y observaciones sobre las características de los diseños analizado y revisado, así como sobre sus respectivos CTA. Se realizan conclusiones.

3. CASO DE ESTUDIO

El problema 9SP ha sido ampliamente estudiado desde que fue presentado por Linnhoff y Ahmad [3]. En su planteamiento, se analizó un caso industrial relacionado con plantas de petrolíferos aromáticos; es decir, instalaciones dedicadas a la producción, separación y purificación de compuestos aromáticos derivados del petróleo como benceno, tolueno y xilenos. Estos compuestos son esenciales en la industria de la petroquímica para la fabricación de plásticos, disolventes, resinas, fibras sintéticas y otros productos de alto valor agregado [6]. La información se presenta en la Tabla 1, en donde se consideran nueve corrientes de proceso, cuatro calientes y cinco frías. La tabla

presenta las temperaturas de suministro y objetivo, flujos de capacidad calorífica, coeficientes de transferencia de calor y costos asociados a servicios auxiliares y equipos de intercambio de calor.

TABLA 1. Datos del problema 9SP (Linnhoff y Ahmad [3]).

Corriente	TS (°C)	TO (°C)	F (kW°C ⁻¹)	h (kWm ⁻² k ⁻¹)
H1	327	40	100	0.50
H2	220	160	160	0.40
H3	220	60	60	0.14
H4	160	45	400	0.30
C1	100	300	100	0.35
C2	35	164	70	0.70
C3	85	138	350	0.50
C4	60	170	60	0.14
C5	140	300	200	0.60
HU	330	250	-	0.50
CU	15	30	-	0.50

Costo de equipos de intercambiadores de calor (\$) = 10,000+350[Área(m²)].

Vida útil = 5 años; Tasa de interés = 0%.

Costo del aceite caliente = 60 \$ kW⁻¹ año⁻¹.

Costo del agua de enfriamiento = 6 \$ kW⁻¹ año⁻¹.

Este caso de estudio ha sido utilizado en numerosos trabajos debido a su complejidad y representatividad dentro de los problemas de integración térmica; por lo tanto, ha permitido evaluar distintas metodologías de diseño y optimización de redes de intercambio de calor. El estudio de diferentes autores, empleando distintos métodos de resolución para el problema de síntesis de redes de intercambio de calor, ha ayudado a ajustar y perfeccionar metodologías para diseño de redes, brindando una base sólida para la evaluación de nuevos enfoques y tecnologías en el campo de integración térmica. Su uso recurrente de igual forma ha evidenciado la importancia de realizar análisis técnicos rigurosos que permitan verificar la coherencia de los diseños generados. En este sentido, el problema 9SP no solo sirve como plataforma de desarrollo metodológico, sino que también representa un problema de referencia para evaluar el desempeño y la viabilidad técnica de las soluciones propuestas. A partir de la revisión bibliográfica presentada en la Tabla 2, se identificaron los diseños de red recientemente propuestos en la literatura que reportan los menores costos totales anuales alcanzados hasta la fecha para el caso de estudio.

Los diseños seleccionados como base para llevar a cabo la metodología mencionada de forma detallada con el objetivo de validar sus condiciones técnicas y evaluar de manera independiente los resultados reportados, se muestran en las Figuras 2 y 3 [4]. Para el desarrollo de sus diseños, Yang y col. [4] utilizan modelos de optimización que resuelven con técnicas híbridas (algoritmos genético y determinista). Aunque los diseños a analizar se reportan con un CTA bajo, se requiere una revisión y validación cuidadosa.





TABLA 2. Comparación de soluciones y CTA reportados para el problema 9SP en los últimos años.

Referencia	Unidades ^a	HU (kW)	CU (kW)	HRAT ^b (°C)	Área total (m ²)	CTA ^R (\$/año)
1. Zamora y col. (2020) [1]	17(0)	24,474	32,194	25.00	17,096.78	2,892,407
2. Yang y col. (2022) [7]	19(3)	24,550	32,270	25.10	16,850.00	2,883,847
3. Huang y col. (2024) [8]	18(4)	23,900	31,620	24.00	— ^c	2,891,500
4. Yang y col. (2025) [4]	14(3)	24,550	32,270	25.10	16,850.00	2,874,179
5. Yang y col. (2025) [4]	19(4)	24,070	31,790	24.30	16,931.00	2,857,945

^a Las cifras entre paréntesis indican el número de divisores presentes en el diseño de la red.

^b HRAT equivalente obtenido en este trabajo utilizando Aspen Energy Analyzer. [9]

^c Área no reportada por los autores.

^R Costos totales anuales reportados en la literatura.

El Diseño de red 1 (Figura 2) cuenta con 14 equipos de intercambio de calor: 9 recuperadores, 2 calentadores y 3 enfriadores. Además, presenta tres divisiones de corriente en H1, H2 y H4. Por otro lado, el Diseño de red 2 (Figura 3) incluye 19 equipos: 14 recuperadores, 2 calentadores y 3 enfriadores, así como cuatro divisiones de corriente, distribuidas en H2, H4 y dos en C5.

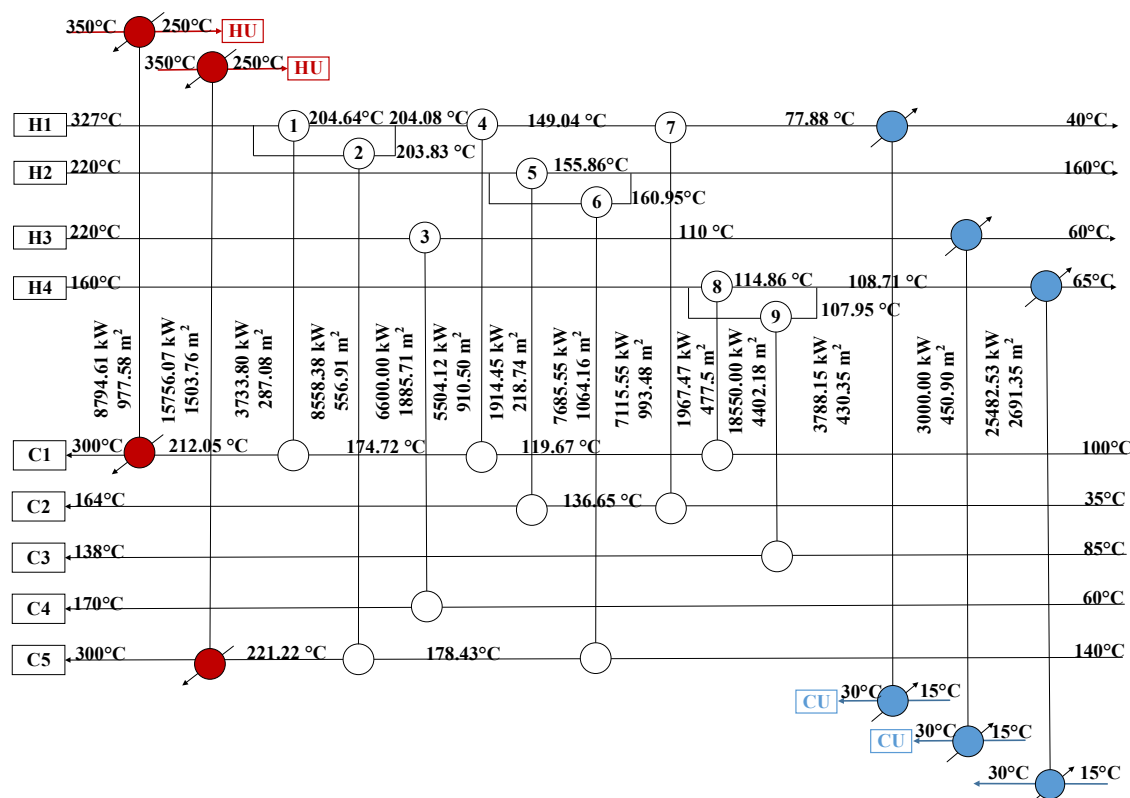


FIGURA 2. Diseño de red 1, presentado por Yang y col. [4], con un CTA reportado de 2,874,179 \$/año.

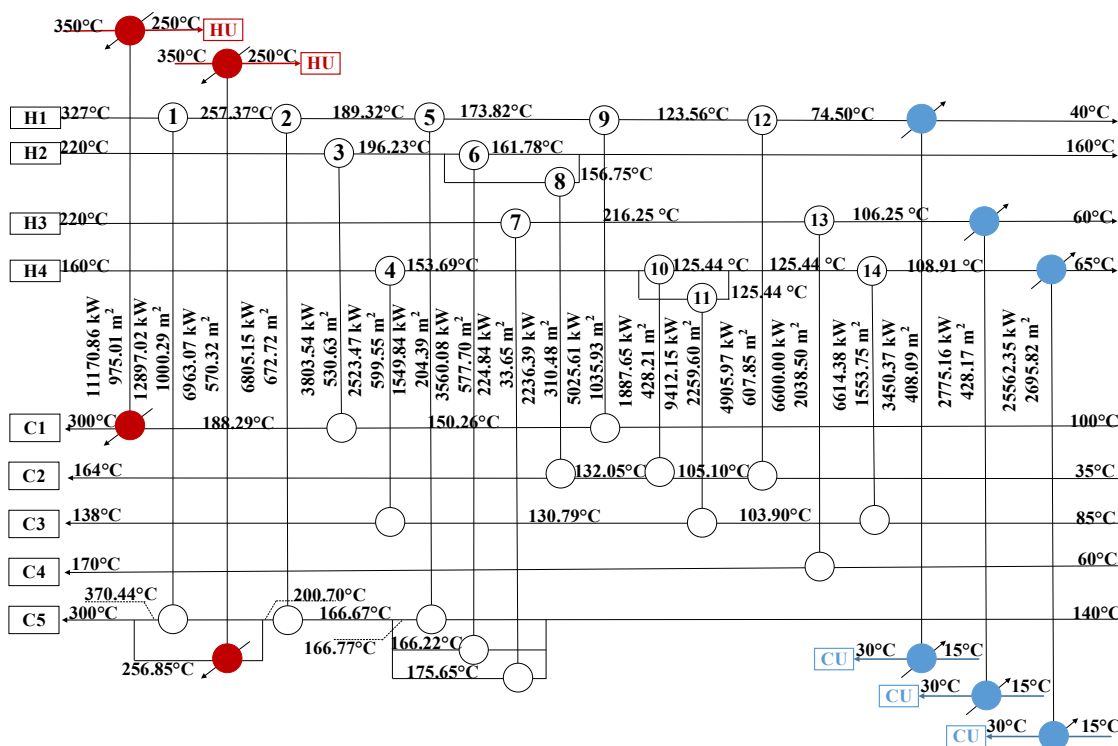


FIGURA 3. Diseño de red 2, presentado por Yang y col. [4], con un CTA reportado de 2,857,945 \$/año.

4. RESULTADOS

Mediante el uso de la metodología propuesta para el análisis de redes de intercambio de calor, se presentan los resultados obtenidos a partir del estudio de las propuestas de diseño reportadas por Yang y col. [4]. Para cada diseño, se revisaron aspectos clave como las temperaturas de suministro y objetivo de las corrientes, las temperaturas asignadas a los servicios auxiliares, los balances de energía por corriente según el diseño. Además, se calcularon temperaturas intermedias y las fracciones de flujo correspondientes. Este análisis permitió identificar errores relevantes en relación con el caso de estudio 9SP, así como errores tipográficos presentes en los diseños, los cuales se detallan en las siguientes subsecciones.

4.1. Diseño de red 1, Yang y col. [4]

Inicialmente, al analizar las propuestas de diseño de red, se detectó que Yang y col. [4] no consideran todos los datos originales del caso de estudio, los cuales se presentan en la Tabla 1. En particular, las condiciones establecidas en estos

diseños utilizan una temperatura de suministro (TS) del servicio auxiliar de calentamiento de 350 °C, lo cual no corresponde con la establecida en el caso original. Así mismo, se identificó un error tipográfico en la salida del enfriador (CU4) correspondiente a la corriente H4, donde se reporta un valor de 65°C, cuando la temperatura objetivo (TO) de dicha corriente es de 45°C (ver Figuras 2 y 3).

A pesar de que los datos considerados por Yang y col. [4] presentan inconsistencias con respecto al caso de estudio original 9SP, se comprobó que, al emplear dichos valores y no los del caso original, es posible reproducir los resultados reportados por los autores, incluyendo las temperaturas intermedias, fracciones de flujo y el CTA de la red. No obstante, al evaluar con las condiciones originales del caso de estudio, los resultados no coinciden, lo que marca la importancia de mantener la coherencia con los datos del caso de estudio de referencia para asegurar la validez del diseño.

El cálculo de las temperaturas intermedias a lo largo de cada corriente se realizó considerando los perfiles de temperatura al intercambio de calor. Dada la topología de la red y la presencia de divisiones de flujo en las corrientes H1,

H2 y H4, se implementó un análisis de grados de libertad que permitió resolver los valores asociados a las fracciones de flujo en cada subcorriente. Los valores obtenidos para las temperaturas intermedias, junto con las fracciones de flujo correspondientes a cada ramificación, se presentan en la Figura 4. La Tabla 3 muestra los resultados comparativos entre lo reportado por los autores y lo obtenido aplicando la metodología propuesta, encontrando una diferencia significativa en el valor del CTA.

Se identificó un valor por encima de lo reportado de 53,345 \$/año, lo que representa un 1.82% por arriba del valor

reportado por Yang y col. [4] para el primer diseño presentado.

TABLA 3. Comparación de resultados reportados del Diseño de red 1 y de los resultados obtenidos a partir del análisis.

CTA reportado Diseño de red 1 (\$/año)	\$2,874,179.00
CTA revisado Diseño de red 1 (\$/año)	\$2,926,524.00
Diferencia absoluta en el CTA (\$/año)	\$52,345.00
Diferencia relativa en el CTA (%)	1.82

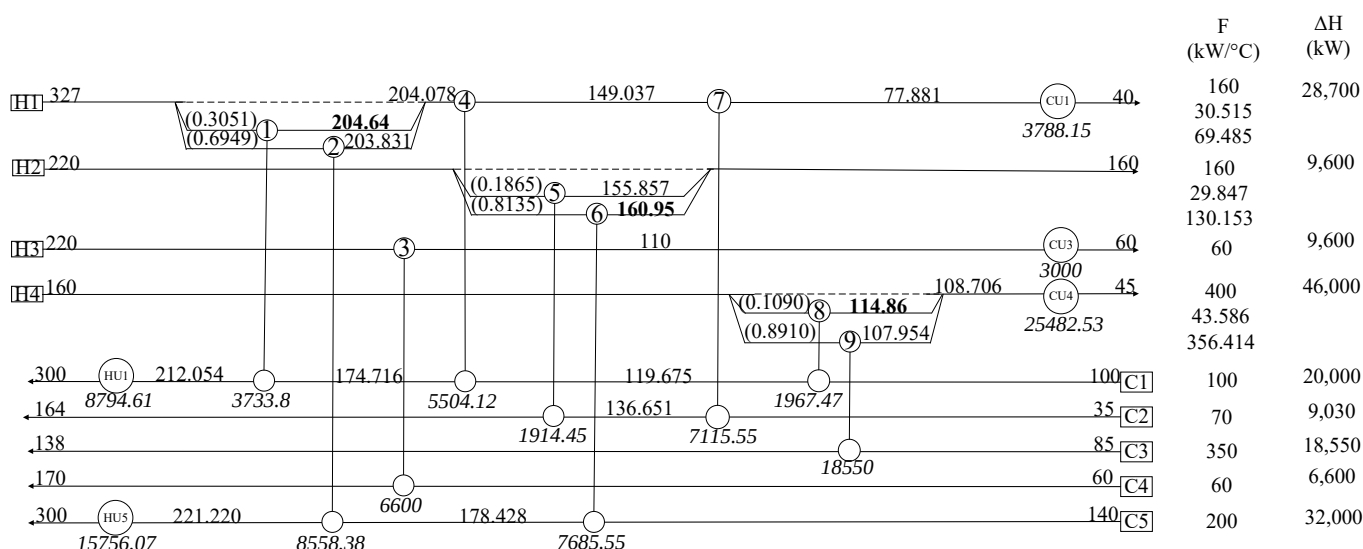


FIGURA 4. Diseño de red 1 con un CTA revisado de 2,926,524 \$/año. (cargas térmicas (kW) en cursiva, temperaturas (°C) en fuente normal, fracciones de flujo entre paréntesis y valores fijos marcados en negritas utilizados para el análisis de grados de libertad).

4.2. Diseño de red 2, Yang y col. [4]

Al analizar la información reportada en el Diseño de red 2 (Figura 3), se detectaron diferencias entre las cargas térmicas asignadas y el balance global de energía para las corrientes H1, H2, C1 Y C2. Estas inconsistencias, detalladas en la Tabla 4, muestran que el mayor residuo se presenta en la corriente H1. Con el objetivo de corregir esta diferencia y determinar el valor correcto, se analizó el comportamiento de la corriente H1 con los equipos de intercambio relevantes, identificando que el punto donde la corriente H1 intercambiaba calor con el equipo 1 y HU5 es importante. A partir de este análisis se identificó que el error principal era de tipo tipográfico, ya que las cargas térmicas correspondientes al equipo 1 y HU5 fueron colocados de manera invertida en el Diseño de red 2, reportado por Yang y col. [4]. Esta corrección permitió ajustar adecuadamente la

carga térmica del equipo involucrado y conciliar las cargas térmicas con el balance global de energía de la corriente H1.

TABLA 4. Balances de energía globales del Diseño de red 2.

Corriente	ΔH_{dat} (kW)	Equipos reportados por corriente (kW)	ΔH_{dis} (kW)	Residuo (R)
H1	28,700	$q_1+q_2+q_5+q_9+q_{12}+q_{CU1}$	34,633.96	5,933.96
H2	9,600	$q_3+q_6+q_8$	9,600.01	0.01
H3	9,600	$q_7+q_{13}+q_{CU3}$	9,600	0.00
H4	46,000	$q_4+q_{10}+q_{11}+q_{14}+q_{CU4}$	46,000	0.00
C1	20,000	$q_9+q_3+q_{HU1}$	20,000.01	0.01
C2	9,030	$q_{12}+q_{10}+q_8$	9,030.01	0.01
C3	18,550	$q_{14}+q_{11}+q_4$	18,550	0.00
C4	6,600	q_{13}	6,600	0.00
C5	32,000	$q_7+q_6+q_5+q_2+q_{HU5}+q_1$	32,000	0.00

Una vez cerrado el balance de energía de la corriente H1, se identificaron nuevamente pequeñas diferencias entre el balance global de energía con respecto a datos con lo reportado en el diseño asociado a las corrientes H1, H2, C1 y C2. Estas diferencias, reflejadas en la Tabla 5, muestran un patrón en común basado en los equipos que interconectan dichas corrientes (q_3 , q_8 , q_9 , q_{12}), lo que permitió plantear un sistema de ecuaciones y realizar el reajuste ligero de las cargas térmicas involucradas.

TABLA 5. Balances de energía del Diseño de red 2 con un ligero incremento en las corrientes identificadas.

Corriente	ΔH_{dat} (kW)	Equipos reportados por corriente (kW)	ΔH_{dis} (kW)	Residuo (R)
H1*	28,700	$q_1+q_2+q_5+q_9+q_{12}+q_{CU1}$	28,700.01	0.01
H2*	9,600	$q_3+q_6+q_8$	9,600.01	0.01
H3	9,600	$q_7+q_{13}+q_{CU3}$	9,600	0.00
H4	46,000	$q_4+q_{10}+q_{11}+q_{14}+q_{CU4}$	46,000	0.00
C1*	20,000	$q_9+q_3+q_{HU1}$	20,000.01	0.01
C2*	9,030	$q_{12}+q_{10}+q_8$	9,030.01	0.01
C3	18,550	$q_{14}+q_{11}+q_4$	18,550	0.00
C4	6,600	q_{13}	6,600	0.00
C5	32,000	$q_7+q_6+q_5+q_2+q_{HU5}+q_1$	32,000	0.00

*Corriente involucrada en el sistema de ecuaciones.

Posteriormente, al calcular las temperaturas intermedias de la corriente C5, se identificó que en el diseño de red 2 (ver Figura 3) se reporta una temperatura de salida de 370.44 °C en el equipo 1, correspondiente a la primera subcorriente de C5.

Al revisar este valor en función del intercambio de calor con la corriente H1, se observó un cruce de temperaturas en el extremo caliente del equipo, lo cual va en contra del principio natural del intercambio de calor.

Este error se relaciona con el problema tipográfico ya mencionado respecto a las cargas térmicas reportadas. Sin embargo, para mantener el análisis fiel con lo reportado por los diseñadores Yang y col. [4], se consideró que las cargas térmicas (aunque incorrectas) fueron tomadas como referencia, mientras que las fracciones de flujo asignadas a la subcorrientes se consideraron válidas. Con base en estas fracciones, se recalcularon las temperaturas intermedias de los equipos en esta división, resolviendo un sistema de ecuaciones. De esta forma, se pudo determinar el comportamiento correcto de la red con los valores corregidos. Finalmente, en la Tabla 6 se muestra la comparación entre el CTA reportado por los autores en el Diseño de red 2 y el valor corregido obtenido a partir del análisis realizado. El CTA revisado presenta una diferencia de 40,120 \$/año, lo que representa un 1.40 % mayor con respecto al valor reportado. El diseño corregido se presenta en la Figura 5, donde se refleja el comportamiento correcto de la red.

TABLA 6. Comparación de resultados reportados del Diseño de red 2 y de los resultados obtenidos a partir del análisis

CTA reportado Diseño de red 2 (\$/año)	\$2,857,945.00
CTA revisado Diseño de red 2 (\$/año)	\$2,898,065.00
Diferencia absoluta en el CTA (\$/año)	\$40,120.00
Diferencia relativa en el CTA (%)	1.40

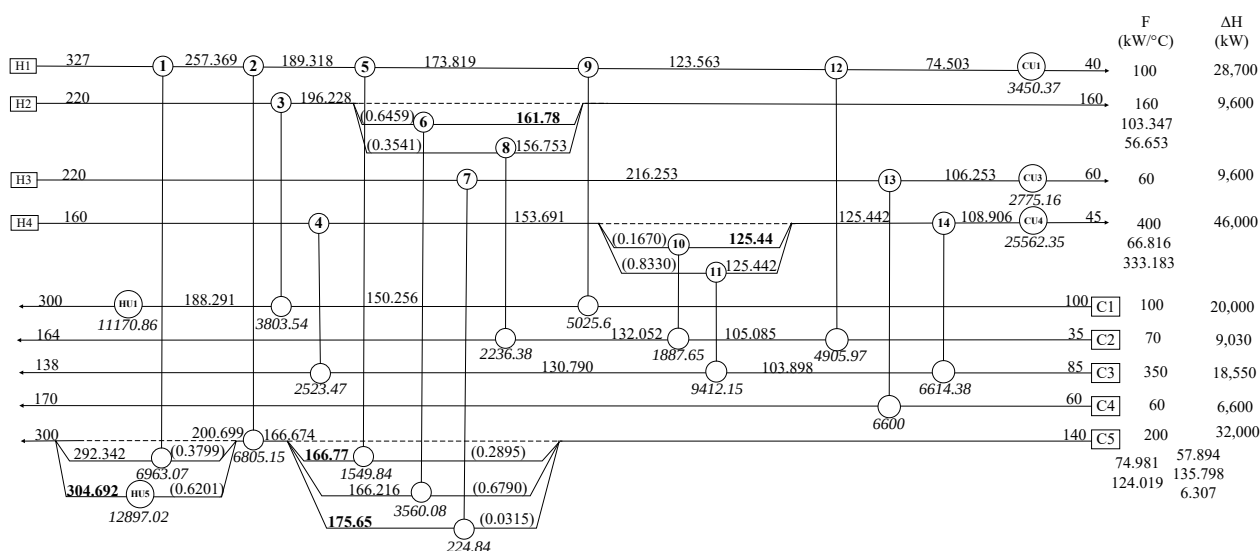


FIGURA 5. Diseño de red 2 con un CTA revisado de 2,898,065 \$/año. (cargas térmicas (kW) en cursiva, temperaturas (°C) en fuente normal, fracciones de flujo entre paréntesis y valores fijos marcados en negritas utilizados para el análisis de grados de libertad).



5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis técnico y económico de dos diseños de redes de intercambio de calor, propuestos recientemente en la literatura para el problema 9SP. El objetivo consistió en verificar la viabilidad técnica y económica de los diseños analizados. A partir de la evaluación realizada, se obtuvieron valores revisados de las cargas térmicas de los equipos, temperaturas intermedias, fracciones de flujo en subcorrientes, áreas de intercambio de calor y CTA.

Los resultados obtenidos demuestran que los diseños propuestos por Yang y col. [4] son técnicamente viables. Sin embargo, se detectó que dichos autores utilizaron una temperatura de suministro alterada para el servicio auxiliar de calentamiento, incrementándola de 330°C a 350°C. Dicha modificación de los datos del problema resuelto les da una ventaja, aumentando la diferencia de temperaturas en el extremo caliente de los calentadores utilizados en sus diseños; produciendo, por consiguiente, equipos de calentamiento con un menor requerimiento de área, y un menor costo que aquellos diseños de trabajos previos de la literatura que sí utilizan los datos originales del problema 9SP. Resumiendo, se demostró que los CTA revisados de los dos diseños de Yang y col. [4] son de 2,926,524 \$/año y 2,898,065 \$/año, respectivamente; y no 2,874,179 \$/año y 2,857,945 \$/año, como dichos autores reportan en su publicación.

REFERENCIAS

- [1]. Zamora-Mata JM, Hidalgo-Muñoz MG, Pedroza-Robles LE y Núñez-Serna RI, *Optimization and utilities relocation approach for the improvement of heat exchanger network designs*. Chemical Engineering Research and Design 156:209-225 (2020). 10.1016/j.cherd.2020.01.024.
- [2]. Linnhoff, B., y Hindmarsh, E., *The pinch design method for heat exchanger networks*. Chemical Engineering Science 38(5):745–763 (1983). 0009-2509/83/050745.
- [3]. Linnhoff, B. y Ahmad S. (1990). *Cost Optimum Heat Exchanger Networks - 1. Minimum Energy and Capital Using Simple Models for Capital Cost*. Computers and Chemical Engineering 14(7):729-750 (1990). 0098-1354/90.
- [4]. Yang, L., Yang, Z., Akram, N., Chen, C., Mo, W., Shen, W., *A hybrid algorithm framework for heat exchanger networks synthesis considering the optimal locations of multiple utilities*. Chemical Engineering Science 301, 12073 (2025). 10.1016/j.ces.2024.120732.
- [5]. Zamora-Mata, J.M., *Temas Selectos de Ingeniería de Sistemas de Proceso I. Apuntes del curso*, Universidad Autónoma Metropolitana (2024).
- [6]. Speight, J. G. *The Chemistry and Technology of Petroleum*. CRC Press, 5 edition (2014).
- [7]. Yang, Z., Zhang, N. y Smith, R., *Enhanced superstructure optimization for heat exchanger network synthesis using deterministic approach*. Frontiers in Sustainability, 3.976717:01-19 (2022), 10.3389/frsus.2022.976717.
- [8]. Huang, X., Xu, Y., Xiao, Y., Shan, L., Duan, H., Cui, G. (2022). *An anti-greedy random walk algorithm for heat exchanger network synthesis*. Chemical Engineering Science 203:219-232 (2024). 10.1016/j.cherd.2024.01.018.
- [9]. Aspen Technology, Inc. *Aspen Energy Analyzer*. <https://www.aspentech.com>.





Modelo de sistema viable para la infraestructura de las electrolineras en el Valle de México

EDGAR BERDEJA¹, ISAIAS BADILLO²

¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica- Zacatenco CDMX ,07738, México

² Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica- Zacatenco CDMX ,07738, México

Autor de Correspondencia: Edgar Berdeja (e-mail: eberdejar2000@alumno.ipn.mx).

RESUMEN De acuerdo con la Agenda 2030 y los Objetivos del Desarrollo Sostenible, siendo específicos los objetivos número siete y once sobre ciudades sostenibles y energía asequible, la problemática relevante actual es la inexistencia de infraestructura adecuada para estaciones de carga de capacidad de más de 100 kW y de estrategias y metodologías para gestionar el despacho de energía y permitir que los diferentes tipos de vehículos eléctricos puedan trasladarse con trayectos más largos. La importancia de que en México se desarrollen proyectos bajo el concepto de una movilidad inteligente (Smart Mobility) es fundamental para enfocar los proyectos en movilidad hacia un enfoque más sustentable. Actualmente en las ciudades más importantes de México, la mayoría están sin infraestructura adecuada para suministrar la recarga de las baterías de los vehículos eléctricos y puntos de interconexión con redes de distribución, por consiguiente el potencial ambiental que pueden aportar los vehículos eléctricos se ve limitado para rutas más largas la infraestructura pública y de acceso a energía asequible sigue rezagada en cobertura y capacidad de carga rápida. El Plan Nacional de Desarrollo incluye dentro de sus objetivos el impulso y motivación de utilización de energías renovables, uso eficiente de la energía y mejorar la movilidad en las ciudades, con ello se enfatiza la transición hacia una movilidad eléctrica y con esto se requiere el desarrollo e innovación de infraestructura eficiente para la gestión de estaciones de carga de autos con tecnologías de movilidad eléctrica, asegurando su viabilidad operativa y sostenibilidad. En este trabajo se propone estudiar e interpretar, desde un enfoque sistémico, las problemáticas y oportunidades que presentan actualmente las estaciones de carga para plantear la estructura de un Modelo de Sistema Viable (MSV) pudiendo proporcionar las herramientas sistémicas adecuadas para mejorar la gestión de recursos

energéticos y administrativos que mejoren la operatividad de estos sistemas de carga.

PALABRAS CLAVE: Electrolineras, Infraestructura, Energía, Sistema Viable, Ciencia de Sistemas.

1. INTRODUCCIÓN

Los Objetivos del Desarrollo Sostenible menciona en el objetivo número siete y once que se deben priorizar el desarrollo de tecnologías y metodologías para avanzar hacia la descarbonización y el uso eficiente de energía por fuentes renovables y libres de emisión de CO₂ [1], por ende la tendencia actual y programas futuros en cuanto a una movilidad eléctrica total en México implican un gran impulso para motivar a los usuarios, productores, inversionistas y empresarios de utilizar y producir autos eléctricos, así como de una infraestructura técnica que respalde su utilidad y una gestión eficiente para llevar a cabo el diseño de las estaciones de carga de los diversos tipos de vehículos con tecnologías de tracción eléctrica [2].

En este trabajo de investigación se desarrollan las bases para construir un modelo que mejora la gestión de los recursos energéticos de las estaciones de carga realizando el estudio de los sistemas de la realidad, buscando la comprensión y conceptualización de los elementos del sistema a estudiar, el método sistémico ayuda a mejorar la información y se unifican las ideas para buscar con eficacia la resolución de problemas y plantear los niveles de gestión operativa que debe de tener una estación de carga en México [3].

Posteriormente, el diseñar un modelo de gestión para las estaciones de carga, da como resultado que se minimicen los problemas de utilización de recursos tanto energéticos como



económicos en estos proyectos en materia de electromovilidad que se planean implementar a futuro en las ciudades.

2. METODOLOGÍA

Buscando la comprensión y conceptualización de los elementos del sistema a estudiar, a través de un método sistémico se pueden identificar y organizar mejor las problemáticas dentro del sistema, por lo que se ha seleccionado a la metametodología de Intervención Total de Sistemas (por sus siglas TSI) siendo esta la más adecuada, que como plantea Jackson [3], ya que permite ahondar más sobre las situaciones problemáticas que no pueden ser entendidas sobre un solo enfoque en los sistemas de carga. El alcance de esta metametodología está en buscar un acuerdo de objetivos entre los actores y entidades relacionadas dentro del sistema que involucra las estaciones de carga; de esta manera se pueden elegir otras metodologías para la gestión de las problemáticas que tienen actualmente los proyectos de las estaciones de carga de autos eléctricos.

2.1. Metodología de Intervención Total de Sistemas

La Intervención Total de Sistemas (TSI) define la situación de la problemática de las estaciones en dos dimensiones. La primera, organiza los problemas de acuerdo con que tan complejos sean y los deriva en si son simples o complejos. Los simples son sistemas deterministas, tienen pocas variables y poca interrelación entre ellas [4]. Una vez realizada su matriz contexto problema, se pudo identificar que la problemática fluctúa entre lo unitario/pluralista, por lo que se opta por el desarrollo del Modelo de Sistema Viable (MSV) y la Metodología de Sistemas Suaves (MSS) como herramientas que se adecúan al tipo de sistema con carácter organizacional y funciones de operación de los sistemas de carga de autos eléctricos.

Previamente a realizar el MSV, mediante la MSS, ya se han identificado los actores y entidades que deben intervenir en un sistema de carga de autos eléctricos, tal como se muestra en la Figura 1 y a su vez ya se ha identificado su interrelación que deben tener cuando se comienzan a plantear los niveles de gestión en el sistema.

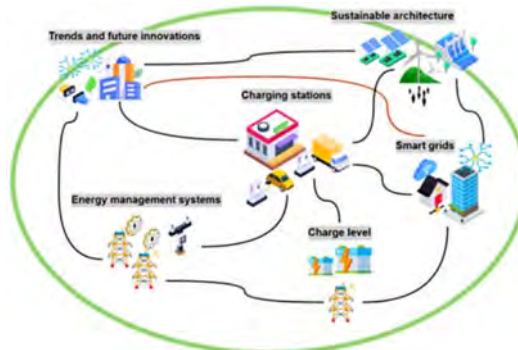


FIGURA 1. Dinámica de Sistemas de Interrelaciones de un Sistema de Carga

2.2. Identificación de Sistemas Relevantes de un Sistema de Carga

El medio ambiente donde se desarrolla el sistema de carga de autos eléctricos en México se puede observar en la Figura 2. En el ecosistema se plantea la dinámica de flujo de las interacciones entre los actores, agrupándolos a través de los entornos a los que pertenecen [5]. Las relaciones más relevantes se encuentran en función del objetivo principal de estudio, que es el sistema de gestión y sus problemáticas actuales.



FIGURA 2. Ecosistema Conceptual de una Electrolinera en México.

La integración de los sistemas relevantes con sus relaciones se puede observar en la Figura 2, el ambiente y las relaciones e interacciones que tienen los sistemas relevantes entre sí, mostrando también simbología y acotaciones en lenguaje de redes para una mejor comprensión de su implementación en la realidad, tal como se lleva a cabo en ingenierías preliminares

de proyectos eléctricos [6]. También se muestran de forma general la interconexión con los sistemas en un ambiente rural, puesto que el alcance en la visión del mundo se contempla.

Una vez identificadas las bases, las relaciones y su interacción de los elementos y entidades bases de los mismos sistemas relevantes, ahora se puede construir la forma del MSV adaptado a las características específicas ya mencionadas y estudiadas en las estaciones de carga de México, considerando sus condiciones de infraestructura, políticas energéticas, y necesidades de los usuarios de autos eléctricos y operadores [7]. Con la formulación del MSV se enfatizan los procesos esenciales, las interacciones entre los actores involucrados, y los niveles de gerencia o gobernanza que tiene el sistema general y los subsistemas.

Partiendo de la interpretación previa de las interacciones e identificación de las bases de los sistemas relevantes, se plantea el siguiente modelo general del MSV, como se observa en la Figura 3.



FIGURA 3. Modelo de Sistema Viable Simplificado de la Gestión de un Sistema de Carga.

Los elementos atenuadores son las restricciones que se interponen en materia de normativa y de políticas públicas; es decir todos los criterios de carácter administrativo que se aplican previamente antes de implementar el sistema de gestión de la estación de carga [8][9].

3. DESARROLLO DEL MODELO DE SISTEMA VIABLE

Para la estructura del Modelo de Sistema Viable de la gestión de la estación de carga, intervienen directamente los canales de intervención de acuerdo con las necesidades de cada sección del Modelo, que son:

- Canal 1: Intervención y Regulación
- Canal 2: Asignación de Recursos
- Canal 3: Interrelaciones Operativas
- Canal 4: Interrelaciones con el Entorno

- Canal 5: Coordinación = Sistema 2
- Canal 6: Monitoreo = Sistema 3*

Tal como se ha explicado la implementación del Modelo de Sistema Viable para, se puntualiza que el sistema 3 es la columna vertebral de la gestión operativa de la estación de carga. Su capacidad para recopilar, monitorear y actuar sobre datos de demanda de carga y de parámetros eléctricos para el despacho de la misma energía, garantiza un funcionamiento eficiente y rentable, tal como acciona directamente el enfoque sistémico a través de estas herramientas sistémicas para el uso eficiente de la energía [10]. También es el puente entre las operaciones diarias (Sistema 1) y las decisiones estratégicas a largo plazo (Sistema 5), tal como se observa en la Figura 4.

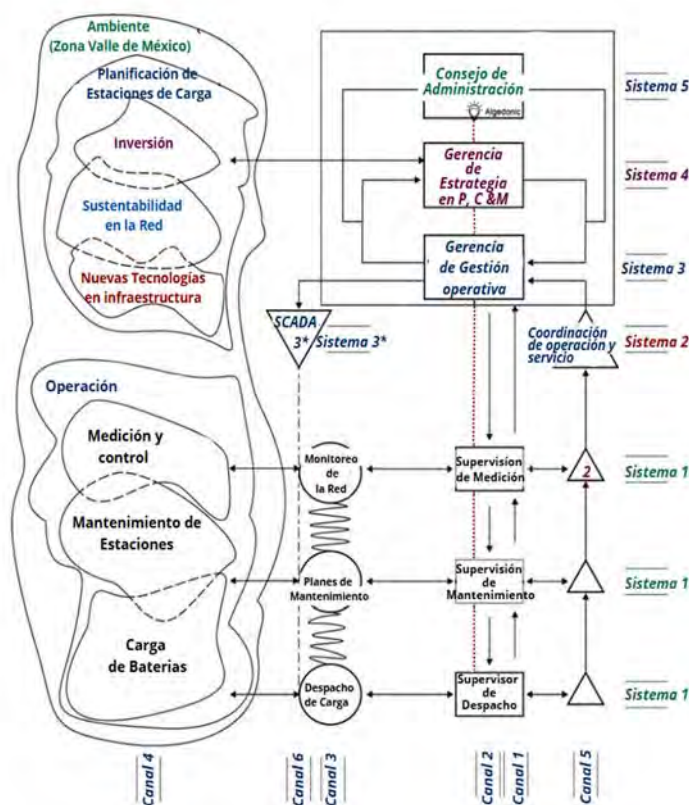


FIGURA 4. Modelo de Sistema Viable de la Gestión de una Estación de Carga de Autos Eléctricos.

En el extremo izquierdo se sitúa el entorno o ambiente externo, representado por factores como la planificación de estaciones de carga, la inversión, la sustentabilidad en la red y la incorporación de nuevas tecnologías de infraestructura. Estos elementos son determinantes, ya que inciden en la forma

en que la red de carga responde a las condiciones de mercado, las políticas públicas y los avances tecnológicos. Desde la perspectiva del MSV, el ambiente constituye la fuente de variedad que el sistema debe absorber para garantizar su viabilidad.

El Sistema 1, correspondiente a las operaciones, está conformado por los procesos principales de la red: medición y control, mantenimiento de estaciones y carga de baterías [9]. Cada uno cuenta con supervisores dedicados que aseguran la ejecución efectiva de las actividades operativas. En este nivel se materializa el propósito fundamental del sistema, es decir, brindar servicios de recarga de manera segura, eficiente y continua.

El Sistema 2, encargado de la coordinación, se representa como la instancia que articula los procesos de medición, mantenimiento y despacho de carga, evitando redundancias o conflictos entre ellos. Este mecanismo es indispensable para asegurar que las operaciones funcionen de manera armónica, especialmente en un entorno donde la demanda energética es variable y requiere respuestas sincronizadas.

El Sistema 3 corresponde al control interno o gestión operativa, liderado por la Gerencia de Gestión Operativa y soportado por herramientas tecnológicas como SCADA, que permiten el monitoreo en tiempo real de la red. Su función es garantizar la eficiencia, la calidad y la optimización de recursos, integrando la información proveniente de los sistemas operativos. La retroalimentación que se genera desde este nivel asegura la corrección de desviaciones y la mejora continua [11].

El Sistema 4, representado por la Gerencia de Estrategia en Planeación, Coordinación y Modernización (P, C & M), cumple con el papel de la inteligencia del sistema, orientada al futuro. En este nivel se analizan factores del entorno, tales como nuevas tecnologías, esquemas de inversión y tendencias de sustentabilidad, con el objetivo de anticipar cambios y diseñar estrategias que mantengan la viabilidad de la red en el largo plazo.

Finalmente, el Sistema 5 está constituido por el Consejo de Administración, el cual simboliza la identidad, la dirección y la política del sistema. Desde esta instancia se definen la misión, la visión y los valores que guían el despliegue de las estaciones de carga, alineando tanto los objetivos operativos como los estratégicos con un propósito común: garantizar la movilidad eléctrica sostenible en la región.

4. ANALISIS DEL MODELO Y DISCUSIONES

A partir del Modelo de Sistema Viable simplificado en la Figura 4, se puede realizar un desglose de los subsistemas del modelo de gestión, en los niveles pertinentes del MSV.

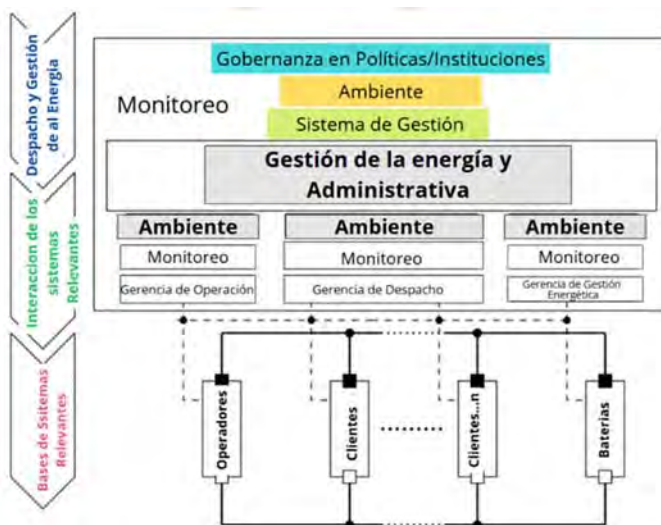
El primer nivel del sistema incluye los valores del sistema, las conexiones físicas, el control y las funciones de dirección.

En el segundo nivel, estos valores se agrupan en cifras operacionales.

En el tercer nivel, las cifras operacionales se utilizan para determinar el estado y las tendencias del sistema. Además, incluye intervenciones autónomas que aseguran la estabilización del sistema de carga. En comparación con el MSV, este nivel refleja procedimientos de retroalimentación.

El cuarto nivel combina el estado del sistema con datos adicionales del entorno externo. La información ambiental se obtiene mediante datos específicos filtrados. Este nivel también contiene las instrucciones para modificar una estrategia operativa superior.

La estrategia operativa se encuentra en el quinto nivel. En este nivel, se calculan los modificadores, que son los valores que regulan el sistema, como la disponibilidad de energía y la



capacidad de generación de energía.

FIGURA 5. Modelo Cibernético de un Sistema de Carga de Vehículos Eléctricos.

A medida que se abstrae la información del sistema de carga estructurado como un modelo se va comprimiendo y volviendo más simple, lo que reduce la complejidad general. Sin embargo, a medida que se sintetiza el modelo, los niveles



más altos no disponen de detalles sobre todas las variables del sistema de carga en general.

El modelo finalmente se puede representar como la Figura 5, en el cual el modelo muestra la viabilidad organizacional, entendida como la capacidad de un sistema para mantenerse adaptativo y sostenible en un entorno complejo.

En este caso, el esquema se aplica a la gestión de la energía, estructurando tres niveles principales: estratégico, táctico y operativo, en coherencia con la lógica cibernética del MSV, volviendo adaptativo y flexible ante perturbaciones un sistema de carga de autos eléctricos.

5. CONCLUSIONES

Con la aplicación de la meta metodología de Intervención Total de Sistemas, se destacan los problemas de los actores en la gestión de estaciones de carga con múltiples dimensiones que no se abordan en las estaciones actuales en operación de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Los problemas que existen en el fenómeno bajo estudio se pueden abordar con herramientas de sistemas, tales como la Metodología de Sistemas Suaves, en la cual se ha podido resaltar que la demanda creciente de infraestructura es importante para la motivación en la adopción de vehículos eléctricos en el Valle de México, ya que plantea la necesidad urgente de desarrollar una red de estaciones de carga adecuada para satisfacer la demanda de energía futura. Esto requiere no solo de un incremento en la cantidad de estaciones de carga, sino también de su distribución estratégica, considerando al Valle de México como una urbe de gran flujo y parque vehicular.

Para el diseño del Modelo de Gestión, se ha encontrado que existe un problema actual en la implementación de un sistema sostenible para las estaciones de carga y esto resalta en las etapas 2 y 3 de la Metodología de Sistemas Suaves, ya que se requiere una planificación y gestión tanto técnica como administrativa y operativa del negocio de las estaciones de carga para que sean vistas como un sistema viable económicamente para las empresas que lleven a cabo estos proyectos.

El uso del Modelo de Sistema Viable en la gestión de estaciones de carga ha proporcionado una nueva forma de estructura para la gestión de una Estación de Carga de Vehículos Eléctricos pudiendo proporcionar novedades en su diseño para implementación y operación del sistema de estaciones de carga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1]. United Nations, *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York, NY, USA: United Nations, 2015. [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- [2]. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, "Movilidad y transporte," 2015. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/biodiesel-movilidad-y-transporte?state=published>.
- [3]. L. G. Sánchez, M. Fabela, M. E. Cruz, y O. Flores, "Electromovilidad. Una nueva modalidad en el sector transporte," Instituto Mexicano del Transporte, publicación bimestral de divulgación externa, NOTAS, no. 189, enero-febrero 2021.
- [4]. M. C. Jackson, *Systems Thinking: Creative Holism for Managers*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2003.
- [5]. S. Beer, *The Brain of the Firm: The Managerial Cybernetics of Organization*, 2nd ed. London, U.K.: Allen Lane, The Penguin Press, 1981.
- [6]. M. Boucetta, N. U. Ibne Hossain, R. Jaradat, C. Keating, S. Tazzit, and M. Nagahi, "The architecture design of electrical vehicle infrastructure using viable system model approach," *Systems*, vol. 9, no. 1, p. 19, 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/systems9010019>.
- [7]. M. Campaña and E. Inga, "Despliegue óptimo georreferenciado de estaciones de carga vehicular pública considerando capacidad de flujo y distancias máximas habilitantes," *I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 2, pp. 68–78, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.33412/idt.v15.2.2248>.





- [8]. B. Wachter, "Un enfoque sistémico del uso final de la energía," *Energy Efficiency is Connected*, 15 de abril de 2022.
- [9]. J. F. Ramírez And J. A. Gómez, "Diseño Eléctrico Para Una Estación De Carga De Vehículos Eléctricos, A Partir De Generación Híbrida," 2017.
- [10]. C. Weiller, "Plug-In Hybrid Electric Vehicle Impacts On Hourly Electricity Demand In The United States," *Energy Policy*, Vol. 39, Pp. 3766–3778, 2011.
- [11]. I. Rahman, P. M. Vasant, B. S. M. Singh, M. Abdullah-Al-Wadud, And N. Adnan, "Review Of Recent Trends In Optimization Techniques For Plug-In Hybrid, And Electric Vehicle Charging Infrastructures," *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, Pp. 1039–1047, 2016.



Edgar Berdeja. Instituto Politécnico Nacional – Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco. Ciudad de México, México.

Ingeniero Electricista por la ESIME Zacatenco, egresado en 2018. Graduado en Master en Ciencias en el 2022 y Actual Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Sistemas en la SEPI ESIME Zacatenco.

Me desempeñé como supervisor de subestaciones eléctricas de las Terminales 1 y 2 en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México del 2018 al 2020, operando subestaciones compactas y de exterior, realizando

pruebas eléctricas a transformadores, interruptores y equipos primarios de la subestación, posteriormente me desempeñé como analista de calidad de energía de redes eléctricas del 2020 al 2022. Desde el 2023 a la actualidad trabajo en Consultoría como especialista en Protección, Control y Medición donde he diseñado ingenierías de P, C&M de la Central Generadora Manzanillo II, Central Tuxpan y parques Fotovoltaicos en España; además de diseño de redes eléctricas de servicios auxiliares, Parques fotovoltaicos, sistemas de almacenamiento BESS y Puntos de Carga de Autos Eléctricos.

He publicado un artículo de revisión en la revista WEVJ- MDPI JCR Q2 y 7 artículos de investigación en materia de movilidad eléctrica en revistas nacionales e internacionales como FACE, CONVERSUS, RIIT, IEEE, sobre mi línea de investigación actual en electromovilidad y electrolíneas.





Diseño de un sistema de acondicionamiento de aire para autobús eléctrico

MARÍA DE JESÚS GALINDO AGUILAR¹, JULIO VALLE HERNADEZ¹

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Apan, Hidalgo, 43920, México

Autor de Correspondencia: María de Jesús Galindo Aguilar (e-mail: ga441564@uaeh.edu.mx).

RESUMEN El transporte ha sido fundamental en el desarrollo de la humanidad, ya que ha permitido el vínculo entre las personas, conexiones entre sociedades y tratados de comercio. Sin embargo, las unidades de transporte convencionales producen grandes cantidades de gases de efecto invernadero por la quema de combustibles fósiles para su operación. Con la finalidad de disminuir estas emisiones se ha planteado el uso del transporte eléctrico, el cual no requiere necesariamente de la quema de combustibles. Sin embargo, la funcionalidad del transporte eléctrico se ve comprometida en zonas donde se necesita climatizar el interior de la unidad para el confort de los pasajeros, puesto que los sistemas auxiliares de aire acondicionado representan un consumo adicional de energía, lo que repercute en la autonomía energética de los vehículos y aumentando con ello los ciclos de recargas de las baterías. Una posible alternativa para reducir la pérdida de autonomía es el aprovechamiento de energía solar, la cual puede proveer una alimentación extra para los bancos de baterías, compensando así la demanda de energía de la unidad por el uso del sistema de climatización. Este proyecto tiene como objetivo diseñar un sistema de aire acondicionado para un autobús eléctrico, mediante la optimización de los procesos energéticos y la selección de equipos que permitan su operación con energía fotovoltaica a fin de reducir el consumo energético proveniente de las baterías. La metodología del proyecto inicia con la identificación de las condiciones de operación para el diseño del sistema de aire acondicionado; posteriormente, se realiza el análisis termodinámico del ciclo de enfriamiento, como tercera etapa, se realiza el dimensionamiento del sistema fotovoltaico de acuerdo con los requerimientos del sistema de climatización. Como resultados se presenta la evaluación energética global del sistema y la reducción del consumo de energía por acondicionamiento de aire.

PALABRAS CLAVE: Autobús eléctrico, Climatización, Análisis energético, Sistema fotovoltaico.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte ha sido fundamental en el desarrollo de la humanidad, permitiendo el crecimiento de vínculos entre personas, conexiones entre sociedades. Sin embargo, el uso de vehículos de combustión interna, que utilizan como combustible gasolina o diésel, emiten una gran cantidad de gases contaminantes al medio ambiente, debido a los procesos de combustión que llevan a cabo [1]. De acuerdo con el inventario nacional de emisiones de México (INEM), publicado en 2008 por la Secretaría del Medio Ambiente, se produjeron 51.5 millones de toneladas de gases de efecto invernadero durante ese año. Se estimó que el 44% de estas emisiones proviene del transporte público, lo cual equivale a 22.7 millones de toneladas [2].

Con el objetivo de disminuir las emisiones de gases contaminantes se ha empleado el uso de nuevas tecnologías, las cuales son más eficientes o hacen uso de fuentes renovables de energía. Por ejemplo, el transporte eléctrico que no requiere la quema de combustibles fósiles para operar, ya que su funcionamiento se basa generalmente en el uso de baterías recargables que almacenan carga eléctrica, para luego alimentar un motor que convierte la energía eléctrica en energía mecánica permitiéndola movilidad del vehículo [3].

No obstante, la funcionabilidad del transporte eléctrico en regiones donde se requiere climatizar el espacio del pasajero se ve comprometida, debido a que los sistemas auxiliares para el acondicionamiento del aire son una carga eléctrica adicional para las baterías del vehículo, disminuyendo su autonomía y aumentando la necesidad de recargas frecuentes.

Un estudio realizado por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, determinó que la climatización de un vehículo eléctrico genera un consumo energético extra de aproximadamente 20% [3]. De igual



manera, el Club del Automóvil en Alemania (ADAC) realizó un estudio en el cual se observó que el uso de aire acondicionado requiere de 1.5 kWh de los 12 kWh que consume el vehículo, representando una disminución del 16% en la energía de movimiento, dando una pérdida de 8 kilómetros de autonomía por hora [4].

En el presente trabajo se propone el uso de un sistema fotovoltaico como una alternativa para reducir la pérdida de autonomía de los vehículos eléctricos. Este sistema proporcionará una alimentación adicional a las baterías, compensando así la demanda energética derivada del acondicionamiento del aire de la unidad de transporte.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del sistema de climatización

El sistema de climatización opera mediante un ciclo de refrigeración por compresión de vapor. Este sistema permite la regulación de la temperatura en el vehículo para garantizar el confort de los pasajeros.

La figura 1 muestra los componentes principales de un sistema de refrigeración por compresión de vapor y los estados termodinámicos del refrigerante durante todo el proceso.

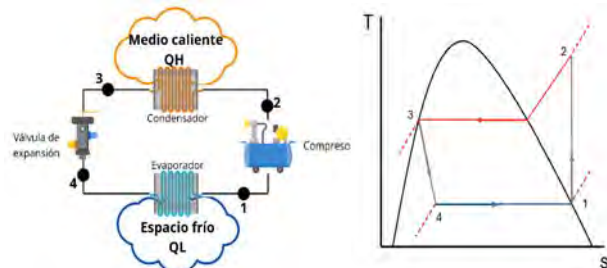


FIGURA 1. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor [Elaboración propia].

Proceso 1-2; Compresión isoentrópica, el refrigerante se comprime desde vapor saturado hasta condiciones de sobrecalentamiento.

Proceso 2-3: Rechazo de calor a presión constante, el refrigerante ingresa a un condensador donde disminuye su temperatura y logra condiciones de líquido saturado.

Proceso 3-4: Estrangulamiento en un dispositivo de expansión, el refrigerante disminuye su presión drásticamente y por ende su temperatura, teniendo una mezcla con baja calidad de vapor.

Proceso 4-1: Absorción de calor a presión constante, debido a su baja temperatura el refrigerante retira calor del medio produciendo el efecto de enfriamiento [5].

Para el ciclo se propone el refrigerante R-1234yf, por su bajo potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés). Este refrigerante es ligeramente inflamable (2L), no tóxico (A), y presenta una buena eficiencia energética [6].

2.2. Características y condiciones de operación del vehículo

Para el análisis energético se considera un autobús eléctrico, con capacidad para 60 pasajeros (50% sentados), accionado por un motor de 100 KW de potencia continua y un sistema eléctrico de 24 V. Su estructura se compone de acero galvanizado, plástico laminado y pisos de madera chapada [7].

La Tabla 1 se muestran las dimensiones del autobús, mientras que la Figura 2 se presenta el diseño del mismo.

TABLA 1. Dimensiones del autobús [7]

Dimensión	Abreviación	Medidas
Largo	L.T.	9.522 m
Distancia entre ejes	D.E.	4.780 m
Volado delantero	V.D.	2.050 m
Volado trasero	V.T.	2.692 m
Altura	AL.	2.930 m
Ancho	A	2.400 m
Peso bruto vehicular	PBV	13,500 kg

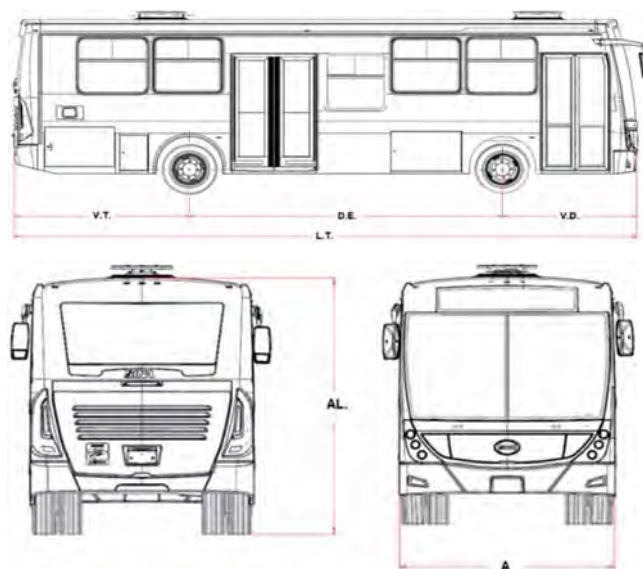


FIGURA 2. Diseño del autobús [7].

Las condiciones de confort que debe cumplir un autobús están dadas por la Sociedad Americana de Ingenieros en Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés) que indican un rango de temperatura entre 23 °C y 25 °C y un nivel de humedad relativa de 50% [8].

Para la evaluación energética del sistema de climatización se consideraron dos ciudades con diferente clima; Pachuca de Soto en el estado Hidalgo y Monterrey en el estado de Nuevo León.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la temperatura durante el año en la ciudad de Pachuca de Soto, con una humedad relativa promedio de aproximadamente el 62% [9].

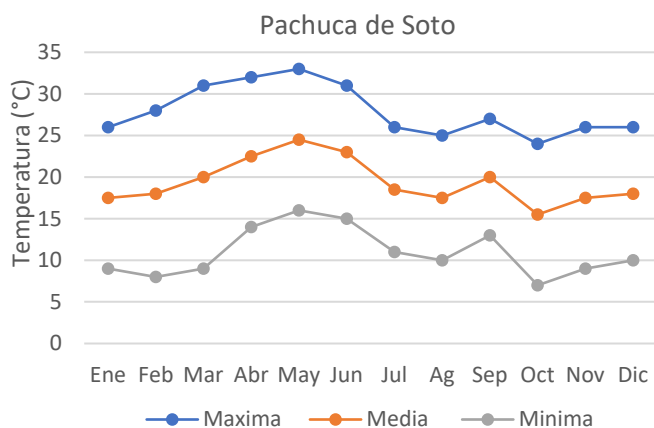


FIGURA 3. Temperaturas anuales en Pachuca de Soto, Hidalgo [9].

La Figura 4 muestra el comportamiento de la temperatura durante el año en la ciudad de Monterrey, con una humedad relativa promedio de aproximadamente el 65% [9].

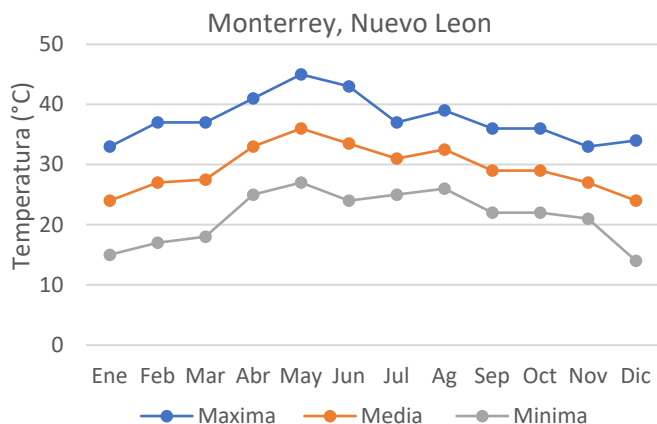


FIGURA 4. Temperaturas anuales en Monterrey, Nuevo León [9].

La Figura 5 muestra el comportamiento de la irradiancia promedio durante el año en las ciudades analizadas [10].

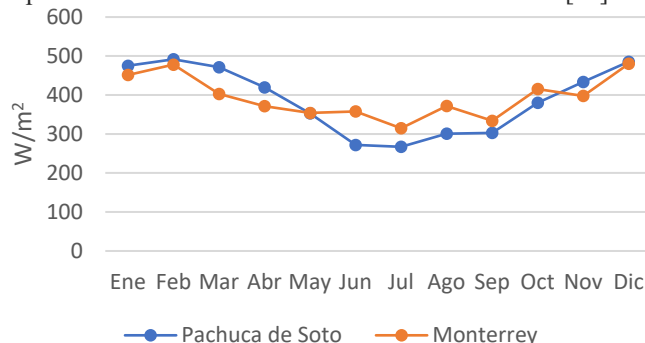


FIGURA 5. Irradiancia anual en Pachuca y Monterrey [10].

2.3. Análisis térmico dentro del autobús

Para este análisis se consideraron las cargas térmicas involucradas; 1) por paredes, la cual se debe a la transferencia de calor del exterior al interior de la unidad, 2) carga térmica por radiación de cristal, donde la radiación solar que atraviesa el cristal calienta el interior del espacio climatizado, 3) carga térmica por ocupante, esta se debe al calor aporta una persona al ambiente debido a la actividad que realice, 4) carga térmica por iluminación, debido a las luces incandescentes o condensantes que ceden calor al ambiente, 5) carga térmica por infiltración, en esta la ganancia de calor se debe a la entrada de aire exterior y por último 6) carga térmica por motor eléctrico ya que todo equipo eléctrico desprende calor.

En la tabla 2 se presentan los parámetros de operación que se emplearan para el cálculo de las cargas térmicas.

TABLA 2. Parámetros de operación [12]

Parámetros de operación		
Coefficiente convectivo ext.	33.04	W/m² °C
Coefficiente convectivo int.	11.50	W/m² °C
Área global de transferencia	43.05	m²
Conductividad de acero galvanizado	50	W/m °C
Conductividad de platico laminado	0.5	W/m °C
Conductividad de madera chapada	0.18	W/m °C
Espesor de acero galvanizado	0.005	m
Espesor de platico laminado	0.008	m
Espesor de madera chapada	0.009	m
Área global del cristal	22.23	m²
Factor de corrección del cristal	0.85	
Calor desprendido según a la actividad	108	W

Numero de lámparas	10	
Potencia de la lámpara	12	W
Tiempo de apertura de puertas	40	seg.

2.4. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, el número de paneles se determinó en función del espacio disponible en el techo, el cual tiene un área de 22.85 m².

La figura 7 muestra el sistema fotovoltaico integrado por los paneles fotovoltaicos, el regulador de carga, las baterías y el inversor.

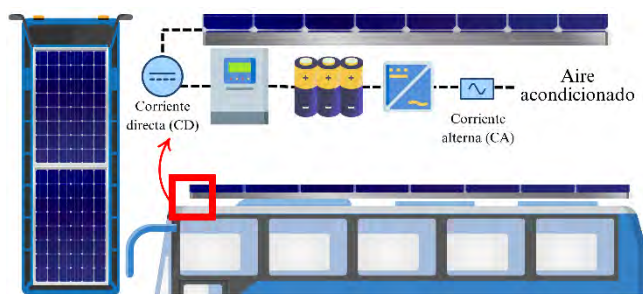


FIGURA 7. Sistema fotovoltaico [Elaboración propia].

3. DESARROLLO

3.1. Estimación del calor a retirar dentro del autobús

Para determinar el calor que debe ser retirado por el sistema de aire acondicionado, se utilizaron las ecuaciones (1-7) de cargas térmicas [13].

Carga térmica por paredes, ecuación (1).

$$Q_p = U \Delta T \quad (1)$$

Donde U es el coeficiente de transferencia de calor global y ΔT la diferencia de temperatura.

Carga térmica por radiación en el cristal, ecuación (2).

$$Q_{rc} = A * R * F \quad (2)$$

Donde A es el área de la superficie traslucida, R la radiación que atraviesa la superficie del cristal y F el factor de corrección (respecto al tipo de cristal).

Carga térmica por ocupante, ecuación (3).

$$Q_o = N_o * Q_{sp} \quad (3)$$

Donde N_o es el número de ocupantes y Q_{sp} el calor desprendido por el cuerpo humano dependiendo la actividad.

Carga térmica por iluminación, ecuación (4).

$$Q_i = 1.25 * N_i * P \quad (4)$$

Donde N_i será el número de lámparas y P la potencia de la lámpara.

Carga térmica por infiltración, ecuación (5).

$$Q_{inf} = M_a * \Delta h \quad (5)$$

Donde M_a es la masa de aire infiltrado y Δh la diferencia de entalpia entre el aire exterior e interior.

Carga térmica por equipos eléctricos, ecuación (6).

$$Q_{ee} = N(1 - \eta) \quad (6)$$

Donde N es la potencia del componente eléctrico y η su rendimiento.

Para determinar la potencia de enfriamiento del sistema de compresión de vapor ($\dot{Q}l$), se utilizó la ecuación 7, la cual representa la suma de todas las cargas térmicas consideradas en el proceso.

$$\dot{Q}l = Q_p + Q_{rc} + Q_o + Q_i + Q_{inf} + Q_{ee} \quad (7)$$

3.2. Análisis del ciclo de refrigeración

Mediante el uso del software Engineering Equation Solver (ESS), se determinaron los estados termodinámicos del ciclo de refrigeración con el refrigerante R-1234yf.

Con los datos obtenidos se determinó, el flujo masico del refrigerante, ecuación (8).

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}l}{h_1 - h_4} \quad (8)$$

Donde $\dot{Q}l$ es la carga de enfriamiento, h_1 y h_4 son las entalpias del refrigerante a la salida y entrada del evaporador, respectivamente.



La potencia mecánica requerida por el sistema de climatización, considerando una eficiencia isentrópica del 87%, se obtiene mediante la ecuación (9).

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (9)$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo masico, h_2 y h_1 son las entalpías a la salida y a la entrada del compresor.

Final mente, el coeficiente de rendimiento (COP) se obtiene con la ecuación (10).

$$COP = \frac{\dot{Q}_l}{\dot{W}} \quad (10)$$

A partir del análisis termodinámico, se determina la energía eléctrica requerida por el sistema de climatización durante un día de operación, ecuación (11).

$$E_E = \frac{\dot{W} \cdot Time}{\eta_c} \quad (11)$$

Donde $\dot{W}$ es la potencia del compresor, Time el tiempo de trabajo del compresor y η_c la eficiencia del compresor.

3.3. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

El número de paneles fotovoltaicos requeridos se calculan en función del espacio disponible en el techo como se muestra en la ecuación (12).

$$N_P = \frac{A_B}{A_P} \quad (12)$$

Donde A_B es el área disponible en el techo del autobús y A_P el área del panel.

En la tabla 3 se presentan las características del panel solar seleccionado.

TABLA 3. Características panel solar monocristalino [14].

Panel solar monocristalino	
Potencia eléctrica	485 W
Dimensiones	1.956 m x 0.992 m x 0.04 m
Peso	25 kg
Voltaje de potencia máx.	38.8 V
Eficiencia energética	20.7%

La energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico se obtiene mediante la ecuación (13)

$$E_P = P * R_s * N_P \quad (13)$$

Donde P es la potencia del panel, N_P es el número de paneles y R_s el recurso solar

En la tabla 4 se muestran las características del tipo de baterías elegidas.

TABLA 4. Características batería LiFePO4 [15].

Batería LiFePO4	
Voltaje de carga completa	29.2V
Capacidad nominal	200 Amp Hrs
Factor de descarga	80%
Eficiencia de carga	96%

La carga para almacenar en función de la energía generada por los paneles se calcula con la ecuación (14).

$$C_A = \frac{E_P}{V_B} \quad (14)$$

Donde E_P es la energía suministrada por el sistema fotovoltaico y V_B el voltaje de la batería.

La carga útil almacenada, considerando el factor de descarga y la potencia del inversor está dada por la ecuación (15)

$$C_B = C_A * D_B * \eta_I \quad (15)$$

Donde D_B el factor de descarga y η_I la eficiencia del inversor.

El número de baterías requeridas se obtiene con la ecuación (16).

$$N_B = \frac{C_B}{C} \quad (16)$$

Donde C es la carga eléctrica por baterías.

La potencia del inversor requerido se obtiene con la ecuación (17).

$$PRI = \frac{\dot{W}}{\eta_I} \quad (17)$$

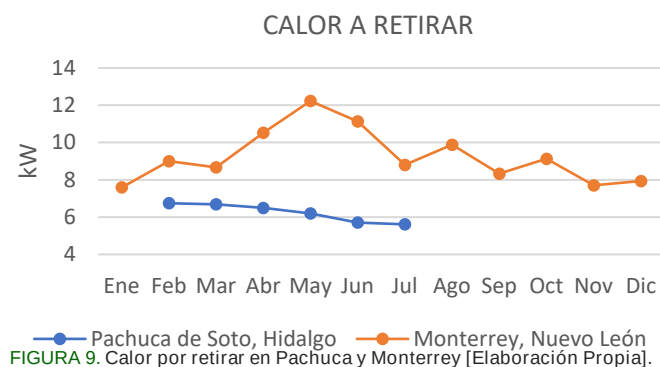
Donde $\dot{W}$ es la potencia máxima generada y η_I la eficiencia del inversor.

4. RESULTADOS

4.1. Calor que retirar por el sistema



En la figura 9 se muestra el calor total que debe ser retirado en la localidad de Pachuca de Soto y en la localidad de Monterrey.



Los resultados indican que en la localidad Pachuca de Soto, Hidalgo en los meses de julio a enero, la temperatura exterior es menor o igual a la interior establecida, por lo que no se requiere la extracción de calor en estos periodos. Por otra parte, en Monterrey Nuevo León, el uso del sistema de climatización es requerido durante todo el año, teniendo los meses de abril a junio como su punto máximo de calor por retirar.

4.2. Ciclo de refrigeración

En la figura 10 se presenta los resultados COP de los sistemas de aire acondicionado que se evaluaron con las condiciones climáticas de Pachuca de Soto, Hidalgo y Monterrey, Nuevo León.

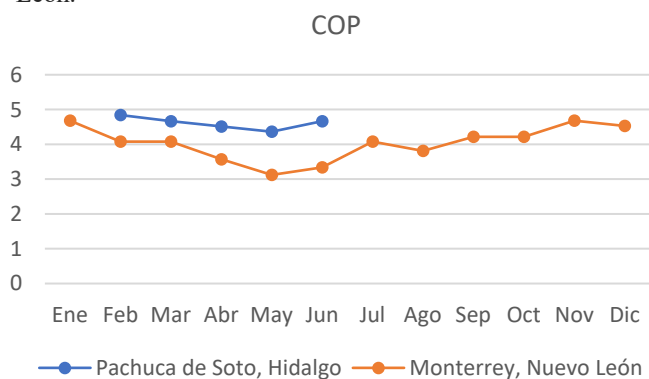


FIGURA 10. Coeficiente de rendimiento de Pachuca y Monterrey [Elaboración Propia].

En los resultados obtenidos se observa que el COP es mayor en Pachuca en comparación con Monterrey, lo que indica que el sistema de climatización opera con mayor eficiencia energética en las condiciones climáticas de Pachuca.

4.3. Trabajo requerido por el compresor

La figura 11 muestra los resultados del trabajo consumido por el sistema durante un año, bajo las condiciones climáticas de localidad de Pachuca de Soto y Monterrey.

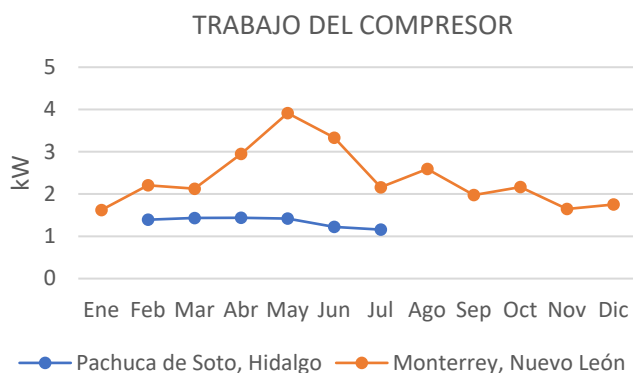


FIGURA 11. Trabajo requerido por el compresor en Pachuca y Monterrey [Elaboración Propia].

Los resultados presentados nos muestran que debido a que la cantidad de calor a extraer por el sistema de climatización es mayor en Monterrey, el trabajo requerido por el sistema de aire acondicionado será mayor en esta región.

4.4. Energía Eléctrica

La figura 12 muestra los resultados de energía eléctrica requerida por el sistema de climatización, durante un día de operación en los distintos meses el año de la localidad de Pachuca de Soto y Monterrey.

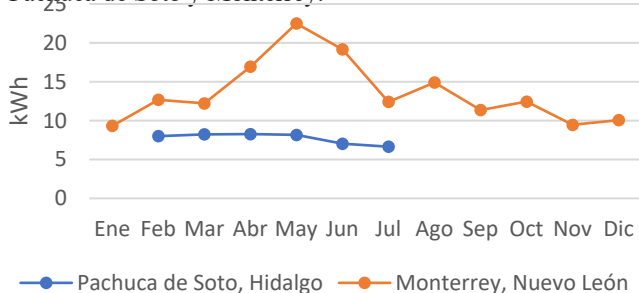


FIGURA 12. Energía eléctrica requerida en Pachuca y Monterrey [Elaboración Propia].

Como se puede observar Monterrey requiere mayor energía eléctrica que Pachuca durante todos los meses, alcanzando su valor máximo en mayo con aproximadamente 17 kWh, esto es debido a las condiciones climáticas elevadas.

4.5. Energía eléctrica generada por los paneles

De acuerdo con la ecuación (12), se pueden colocar 11 paneles fotovoltaicos en el techo de la unidad, debido a las dimensiones de los módulos y el espacio disponible.

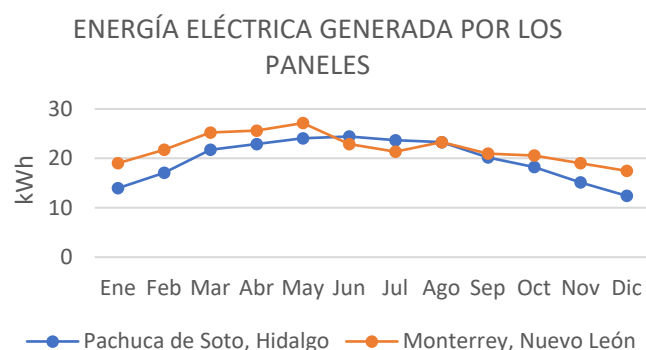


FIGURA 13. Energía eléctrica generada por los paneles en Pachuca y Monterrey [Elaboración Propia].

Se observa que la energía generada a lo largo del año en ambas localidades no permanece constante. En Monterrey, la producción es mayor durante los meses de marzo a junio, teniendo su máximo 37 kWh, mientras que en Pachuca de Soto, el máximo se presenta en junio con aproximadamente 33 kWh.

4.6. Carga por almacenar

En la figura 14 se muestran la energía total que debe almacenar la batería en función de la energía generada por los paneles.

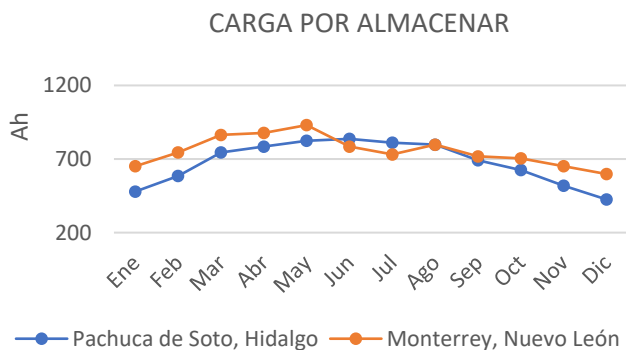


FIGURA 14. Carga por almacenar por las baterías [Elaboración Propia].

Como podemos observar Monterrey requiere un mayor almacenamiento de energía durante la mayor parte del año en comparación con Pachuca. Debido a que está relacionado con la producción de energía solar.

4.7. Carga útil almacenada por los paneles

La figura 15 se presenta la energía útil que realmente se puede ser utilizada.

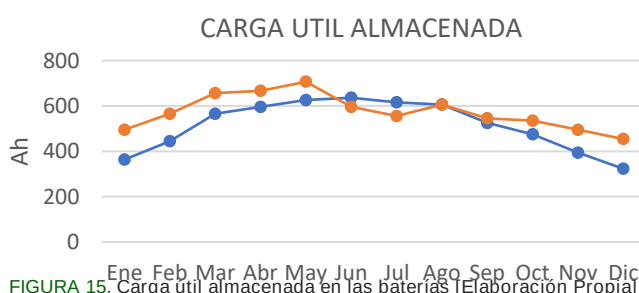


FIGURA 15. Carga útil almacenada en las baterías [Elaboración Propia].

Como podemos ver en ambas localidades se presentan incrementos en los meses de marzo a mayo y disminuciones en los meses de octubre a enero.

4.8. Número de baterías

La figura 16 muestra la cantidad de baterías necesarias a lo largo del año para ambas ciudades, resultando casi siempre mayor en Monterrey.

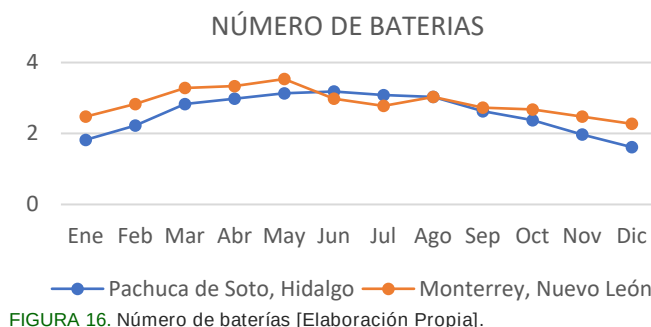


FIGURA 16. Número de baterías [Elaboración Propia].

4.8. Potencia del inversor

La figura 17 se presentan los resultados de la potencia requerida por el inversor. Como podemos observar en la localidad de monterrey se muestra una variación más notable, con un pico máximo de 3.10 kW.

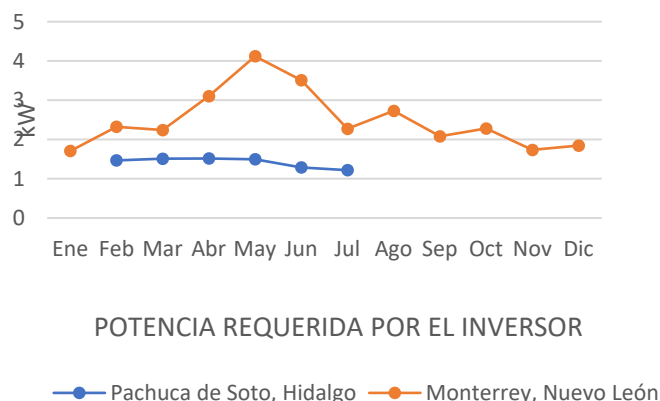


FIGURA 17. Carga útil almacenada en las baterías [Elaboración Propia].

6. CONCLUSIONES

Los sistemas auxiliares en las unidades de transporte, como lo es el aire acondicionado, representan una carga eléctrica adicional a las baterías de un vehículo eléctrico. Lo que ocasiona una disminución en su autonomía y aumentando la necesidad de recargas frecuentes.

De acuerdo con los resultados analizados anteriormente podemos concluir que en ambas localidades los sistemas fotovoltaicos son capaces de abastecer de energía a las unidades de transporte, operando con sistemas de climatización.

Con respecto al sistema de refrigeración el análisis de los resultados mostró que el rendimiento del sistema permanece casi constante en la región de Pachuca, mientras que en monterrey la variación del rendimiento es menor ya que las condiciones de temperatura ambiente son un factor muy importante.

REFERENCIAS

- [1]. Oscar Flores. 2014. Resumen de boletines. Instituto del
- [2]. Transporte. De <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=396&IdBoletin=149>
- [3]. Gobierno de México. (s.f.) Metrobús. Ciudad de México. Monitoreo de emisiones. De <https://sedema.cdmx.gob.mx/archivo/emision-gases-contaminantes>
- [4]. Williams, C. M., Álvaro, V. M., & Esteban, R. M. J. 2022. Modelamiento computacional del comportamiento térmico en la cabina de un vehículo eléctrico para predecir el consumo energético por aire acondicionado. De <https://doi.org/10.58011/47r8-ej53>

- [5]. David Plaza, D. P. 2024. Cuenta batería consume el aire acondicionado en un coche eléctrico. De <https://www.motor.es/noticias/cuanta-bateria-a-consume-aire-acondicionado-coche-electrico-2024103804.html>
- [6]. José M. García. 2017. Acondicionamiento de aire. De <https://termodinamica.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- [7]. Gas servei. S.f. Ficha técnica R-1234yf. De <https://gas-servei.com/wp-content/uploads/2024/02/ficha-tecnica-r-1234yf-gas-servei.pdf>
- [8]. DINA. 2024. Silux E. De <https://www.dina.com.mx/vehiculos/silux-e/>
- [9]. Ordóñez, A. S.f. Estándar ASHRAE 55. De <https://www.seiscubos.com/conocimiento/estandar-ashrae-55>
- [10]. Weather Spark. S.f. El clima y el tiempo promedio en todo el año. De https://es.weatherspark.com/y/5154/Clima-promedio-en-Monterrey-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#google_vignette
- [11]. JRC. 2016. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). European Commission. De https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
- [12]. UNAM. S.f. Radiación Solar en la República Mexicana en un plano horizontal. Facultad de Arquitectura. <https://www.homerenergy.com/>
- [13]. Yunes A. Cengel. 2007. Capítulo 3. Transferencia de calor y masa. 3 Edición.
- [14]. María T. Sánchez. 2001. Capítulo 11. Balance térmico en la instalación frigorífica. Ingeniería del Frío: teoría y práctica. 1 Edición.
- [15]. IUSASOL. 2020. IUSASOL- PS-72BB. Modulo monocristalino perc shingled 470 – 490W. De <https://www.iusasol.mx/>
- [16]. EPEVER. S. f. Inversor de onda sinusoidal pura. De <https://www.epever.com/product/ipower-series-110-120vac-pure-sine-wave-inverter/>





María de Jesús Galindo Aguilar. Alumna de la Licenciatura en Ingeniería en Tecnología del Frío de la Escuela Superior de Apan, Universidad



Autónoma del Estado de Hidalgo, UAEH, Apan, Hidalgo. También se sugiere incluir el área de investigación principal a la que se dedica el autor.

Ha desarrollado trabajos de investigación enfocados a el diseño de sistemas de refrigeración y acondicionamiento de aire, conservación de alimentos y unidades biológicas. Ha participado en el Congreso Nacional de Estudiantes de Energías Renovables (CNEER - UNAM), Curso de verano,

jóvenes en la ciencia V-28 con ISSN 2395-9797, y en el Congreso Internacional de Tecnologías en Refrigeración (CiTeR 2024) con ISBN 978-607-26886-0-5.





Impacto de la generación distribuida solar en la demanda del Sistema Eléctrico Nacional

MARÍA FERNANDA GARCÍA¹, CECILIA MARTÍN DEL CAMPO²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

²Unidad de Planeación Energética, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México

Autor de Correspondencia: María Fernanda García Barrera (e-mail: fernandagb03@gmail.com)

RESUMEN La capacidad instalada de generación distribuida (GD) solar en México se ha cuadruplicado en los últimos cinco años. Con base en dicha tendencia, así como en los bajos costos de la energía entregada, se espera que en los próximos años siga aumentando esta forma de generación, por lo que es importante analizar el impacto que podría tener en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Dado que uno de los objetivos de la GD es que la producción de energía eléctrica sea cerca de los centros de consumo y que no pase por la Red General de Transmisión, el SEN se podría beneficiar de una reducción de la demanda en ciertos horarios y regiones, sin embargo, hay que conocer las implicaciones. En este sentido, para este trabajo, la GD de origen solar fotovoltaico se analiza como una reducción de la demanda y no como parte de la matriz de generación. Se obtiene la proyección del perfil de generación de la energía solar distribuida hacia el año 2050, comparado con el perfil de demanda horaria de las nueve Gerencias de Control Regional para dos periodos característicos: en verano y en invierno, cuando se presentan los niveles más altos y bajos de demanda eléctrica, respectivamente. Los resultados muestran que, en algunas regiones, la GD solar ayuda a desplazar una hora más tarde el pico de la demanda, así como a disminuir su magnitud.

PALABRAS CLAVE: Generación distribuida solar, curvas de demanda eléctrica, gerencia de control regional, Sistema Eléctrico Nacional.

1. INTRODUCCIÓN

En 2023, la capacidad instalada de energías renovables a nivel global registró un incremento mayor al 60 % respecto al año anterior, alcanzando 565 GW [1]. La principal responsable de este aumento fue la energía solar fotovoltaica a gran escala, que prácticamente duplicó su capacidad en todo el mundo. No obstante, la generación distribuida fotovoltaica también mostró un crecimiento importante, con un crecimiento superior al 60 % durante el mismo año [1]. Este comportamiento refleja una marcada tendencia internacional hacia la expansión de esta modalidad, lo que refuerza la relevancia de analizar los posibles impactos que tendrá en un sistema eléctrico como el mexicano.

A nivel nacional, hasta el segundo semestre de 2024, la capacidad de generación distribuida (GD) en México alcanzó los 4,447.92 MW [2]. En ese último año se incorporaron 1,086 MW, la cifra más alta registrada en un solo año. Del total instalado, 4,421.65 MW corresponden a sistemas de energía solar fotovoltaica, lo que equivale al 99.4 % de la capacidad nacional. Los estados con mayor concentración de sistemas de generación distribuida solar fotovoltaica (GD-FV) son Jalisco, Nuevo León, Chihuahua, Guanajuato y el Estado de México, principalmente en las regiones de control Occidental, Noreste y Norte. La Figura 1 corresponde a la capacidad instalada hasta el año 2024 en las Gerencias de Control Regional (GCR). Si bien no existe una sola definición para la generación distribuida, la Agencia Internacional de Energía (IEA) se refiere a los recursos de generación distribuida como aquellos recursos a pequeña o mediana escala conectados principalmente en niveles bajos de tensión, como las redes de distribución, o bien, que se encuentran cerca del usuario final [3]. Entre las tecnologías



disponibles, la más extendida es la energía solar fotovoltaica, dado que su implementación resulta más práctica en sectores residencial, comercial e industrial, mediante la instalación en techos de las naves industriales, casas o áreas amplias como estacionamientos.

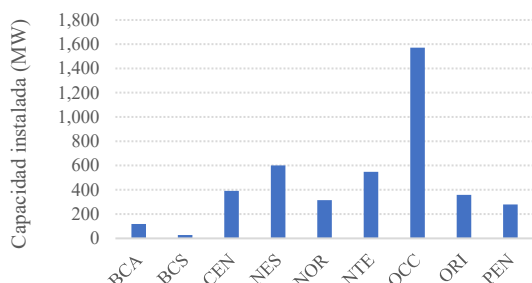


FIGURA 1. Capacidad instalada al 2024 por gerencia de control regional.

Las centrales de generación distribuida, a diferencia de las centrales a gran escala centralizadas, se conectan a las redes de distribución, y al estar cerca de los centros de consumo, reducen la saturación de las redes de transmisión, así como las pérdidas y costos asociados a ello.

En México, los sistemas de generación distribuida ofrecen beneficios adicionales tanto a nivel social, económico y hacia el medio ambiente. Sin embargo, diversos estudios han analizado los posibles efectos de las centrales de GD sobre la red eléctrica, ya que la variabilidad inherente a la disponibilidad del recurso solar puede generar ciertos retos en la operación de las redes de distribución.

1.1. Escenario nacional

De acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2024-2038, se prevé que la generación distribuida solar siga creciendo en los próximos años. Este programa plantea dos escenarios: el de planeación, con una tasa media de crecimiento anual (TMCA) del 9.5 % hacia 2038, y el escenario ampliado, más ambicioso, con una TMCA del 12.3 % para ese mismo año. Para 2024, el PRODESEN estimaba una capacidad instalada acumulada de 3,963 MW en el escenario de planeación y de 4,335 MW en el escenario ampliado. Sin embargo, las estadísticas más recientes de solicitudes de interconexión de centrales de generación distribuida [2], con datos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) hasta diciembre de 2024, muestran que entre 2020 y 2024 la TMCA fue de 30.13 %. Asimismo, la capacidad instalada en 2024 alcanzó 4,447.92 MW, superando incluso las proyecciones del PRODESEN para el escenario ampliado (Figura 2).

A partir de estos resultados, resulta más probable un escenario de alta penetración de sistemas de generación distribuida. Por esta razón, en el análisis del presente trabajo se utiliza la trayectoria de crecimiento del escenario ampliado del PRODESEN hasta 2038. Posteriormente, y hasta el horizonte de 2060, se proyecta un crecimiento siguiendo una tendencia basada en la función logística.

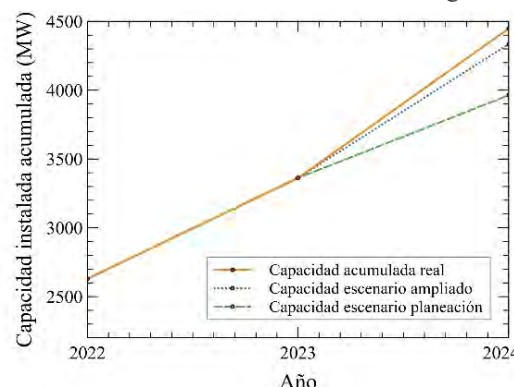


FIGURA 2. Capacidad instalada real y estimaciones de PRODESEN para la GD-FV al 2024.

2. PROYECCIÓN DE CRECIMIENTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA

2.1 Función logística

En sus inicios, la función logística se empleó para representar el crecimiento poblacional y ciertos fenómenos naturales. Esto se debe a que, a diferencia de otros enfoques como el lineal o el exponencial, el modelo logístico considera la existencia de recursos limitados, lo cual impide un crecimiento indefinido de cualquier población. Así, los resultados se representan mediante una curva en forma de “S”, caracterizada por un crecimiento acelerado en las etapas iniciales, seguido de una fase de estabilización y, finalmente, una desaceleración a medida que se alcanza la saturación al final de la curva [4].

Gracias a su capacidad de ajuste en múltiples campos de aplicación, diversos estudios [4-7] han recurrido a la función logística para proyectar tanto la demanda de energía como la adopción de nuevas tecnologías [4], como es el caso de la generación distribuida.

La expresión matemática que define la función logística también es conocida como la ecuación de Verhulst, en honor a Pierre François Verhulst, quien la presentó por primera vez en 1838, y está dada por la ecuación (1):

$$y(t) = \frac{L}{1 + e^{-k(t-t_0)}} \quad (1)$$

Donde: la función $y(t)$ es la capacidad instalada que se busca estimar, L es el límite superior, k es la tasa de crecimiento, t es el año y t_0 es el año de inflexión; es decir, donde la curva alcanza $\frac{1}{2}$ de L .

Para llevar a cabo el ajuste del modelo logístico en las proyecciones de generación distribuida, primero se proponen valores iniciales para los parámetros k y t_0 . Posteriormente, se utiliza la herramienta *Solver* de Excel, con el objetivo de encontrar los parámetros óptimos que representen mejor la tendencia de crecimiento y saturación proyectadas para la generación distribuida solar.

Dado que se desean obtener las proyecciones de crecimiento de GD-FV en cada Gerencia de Control Regional, se realiza el mismo procedimiento para las nueve regiones consideradas, tanto para la capacidad instalada como para la generación de energía esperada. La Figura 3 muestra la capacidad instalada en todo el país, y es un ejemplo del comportamiento que muestra la GD-FV en cada región.

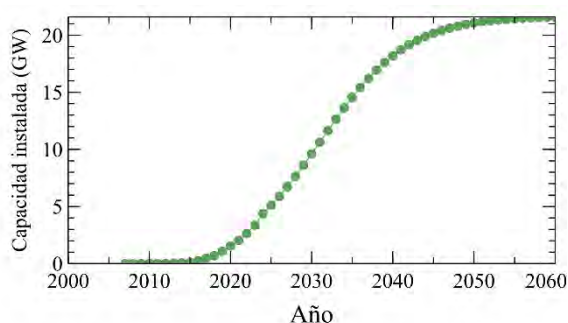


FIGURA 3. Proyección de crecimiento de la capacidad de GD-FV con la función logística.

2.2 Generación de electricidad por sistemas de GD-FV

Con la proyección de la capacidad instalada por cada región de control, se estima la generación de electricidad que podría producirse por los sistemas de GD-FV. Para lo anterior, se consideran dos días característicos del año, uno durante el invierno y otro en verano, periodos en los que se registran la mínima y máxima demanda del SEN, respectivamente. Para este trabajo, los dos días característicos tomados como referencia son: a) martes 04 de enero de 2024 y b) martes 25 de junio de 2024. Es importante que ambos sean el mismo día de la semana para poder realizar una comparación del comportamiento horario de la demanda en un día laboral.

Para obtener el perfil de demanda con la GD-FV se considera la radiación solar incidente en una superficie

inclinada para una ciudad representativa de cada región, indicadas en la Tabla 1.

TABLA 1. Ciudad de referencia considerada para obtención de la radiación solar incidente de cada región de control.

Región de control	Ciudad de referencia
Occidente (OCC)	Guadalajara
Norte (NTE)	Chihuahua
Noroeste (NOR)	Hermosillo
Noreste (NES)	Monterrey
Central (CEN)	Ciudad de México
Oriental (ORI)	Oaxaca
Peninsular (PEN)	Mérida
Baja California (BCA)	Mexicali
Baja California Sur (BCS)	La Paz

Los valores mensuales promedio de la radiación global diaria sobre una superficie horizontal para cada ciudad se obtienen del promedio de los últimos 25 años del sitio web de la NASA [8]. La radiación solar total sobre una superficie inclinada, I_T , durante una hora se estima con base en el modelo de cielo isotrópico difuso, adaptado por Lui y Jordan en 1963 [9] y está dado por la ecuación (2):

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 + \cos \beta / 2) + I_{pg} (1 - \cos \beta / 2) \quad (2)$$

Donde I_b es la radiación directa sobre una superficie inclinada en W/m^2 , R_b es el cociente de la radiación directa sobre una superficie horizontal y una superficie inclinada. I_d es la radiación difusa, β es el ángulo de inclinación de la superficie e I_{pg} es la radiación reflejada del suelo.

Posteriormente, la radiación horaria I_T en W/m^2 se multiplica por el número de m^2 de superficie que ocuparía la capacidad instalada en cada región, la cual, se obtiene con la metodología de la función logística. De esta manera, se obtiene el perfil de generación horaria para los dos días analizados. A manera de ejemplo, la Figura 4 muestra el perfil de la región occidental para el día 25 de junio.

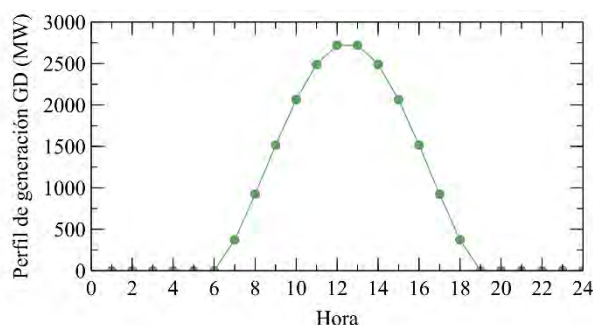


FIGURA 4. Perfil de generación horaria fotovoltaica de la región Occidental para el 25 de junio.

2.3 Aportación de la GD-FV a la demanda regional del SEN

La estimación de la demanda horaria para todo el año por cada región de control se obtiene de la información histórica publicada por el CENACE. Esta demanda se obtiene para los mismos días en que se estima la radiación solar incidente. En la proyección de los siguientes años se considera la tasa de crecimiento reportada en el PRODESEN también diferenciada por cada región de control.

Se estima entonces el perfil de demanda diario considerando, por una parte, el perfil de demanda incluyendo la penetración de generación distribuida estimada para cada región en la temporada señalada, y por otra parte, el perfil de la demanda estimada sin considerar la aportación de la generación distribuida. Finalmente, al dato de la demanda real sin GD-FV se le resta la energía producida por la GD para ese mismo día, año y región y se obtiene el perfil de la “nueva” demanda con GD.

3. CURVAS REGIONALES

Se aplica la metodología previamente descrita para obtener las curvas de demanda de cada región del SEN para los dos días representativos del año. Con base en las proyecciones al horizonte del año 2060, se estima el consumo de electricidad y la contribución de la energía generada con sistemas de GD-FV para los años 2028, 2033, 2038, 2045 y 2050. Para efectos del presente trabajo, se selecciona el año 2033 como referencia para visualizar las curvas de demanda. Lo anterior responde a dos consideraciones principales: la primera es que se espera que la GD-FV continúe con un crecimiento significativo hacia ese año y por lo tanto su impacto sobre las curvas de demanda es claramente observable y, por otro lado, el año 2033 no es un horizonte temporal demasiado lejano, lo cual reduce la magnitud de la incertidumbre asociada a las proyecciones. Asimismo, aunque el análisis se lleva a cabo para las nueve regiones de control que conforman el SEN, en este trabajo se decide presentar, por cuestión de espacio, los resultados correspondientes a cuatro regiones. Las tres primeras regiones: Occidental, Norte y Noreste, fueron seleccionadas porque, de acuerdo con las estadísticas actuales y proyecciones, concentran la mayor proporción de capacidad instalada de GD-FV y continúan con una tendencia sostenida de crecimiento. Adicionalmente, se incluye la región peninsular, cuya incorporación tiene el objetivo de ilustrar cómo las curvas de demanda diaria pueden diferir significativamente entre las regiones. Estas diferencias pueden ser originadas por factores tan diversos como la temperatura ambiente, humedad o los patrones de consumo de electricidad

asociados a la actividad económica de cada zona. De esta manera, la comparación permite destacar no solo el efecto de la GD-FV en aquellas regiones con mayor penetración, sino también la diversidad y variabilidad que existen dentro del propio SEN.

3.1 Occidente

La región occidental, caracterizada principalmente por tener una importante actividad industrial y un clima templado, es la región de mayor demanda del SIN y también la que más importa energía eléctrica de otras regiones. Abarca los estados de Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Nayarit y Querétaro. Asimismo, es la GCR que mayor penetración tiene de generación distribuida. La Figura 5 muestra las curvas de demanda con y sin generación distribuida para los días seleccionados. En esta región la curva de la demanda no crece tan aceleradamente a lo largo de las horas del día y tampoco se muestra una diferencia significativa entre la magnitud de la demanda en ambas temporadas, principalmente debido a que es una región de clima templado y no tiene una necesidad tan grande de equipos de aire acondicionado.

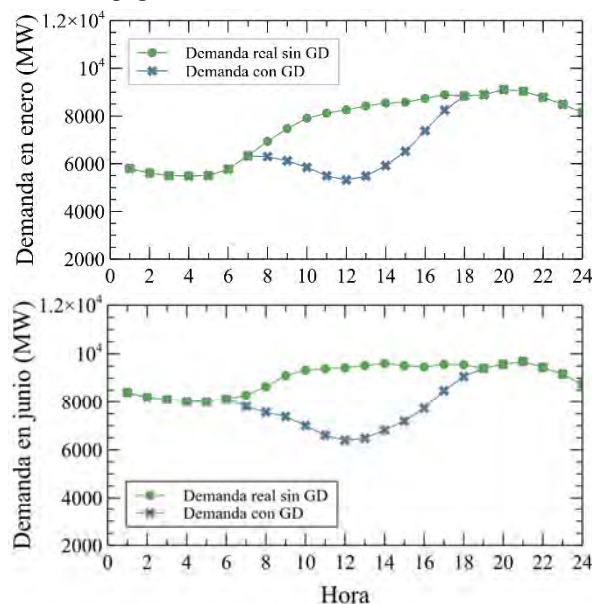


FIGURA 5. Perfil de demanda con y sin influencia de la GD-FV para la región Occidental en el año 2033. Arribase muestra el día a) 04 de enero. Abajo se muestra el día b) 25 de junio.

En este caso, la demanda durante las horas del día, entre las 10 y las 18 horas, es más estable, incluso durante el verano, lo cual puede ser asociado a la actividad industrial de la región. Si bien la región Occidental es la región con una mayor capacidad instalada de GD-FV, no se observan efectos

drásticos en el cambio del pico de la demanda. Sin embargo, sí se observa una cobertura de la demanda durante las horas del día con la generación distribuida.

3.2 Norte

Esta región, conformada por los estados Chihuahua, Durango y una parte de Coahuila, se caracteriza por tener un clima extremo, lo que genera una marcada diferencia entre la magnitud de la demanda durante el invierno y el verano, derivada del aumento y disminución de la temperatura ambiental. En la temporada de verano, una parte importante del consumo de electricidad proviene del uso de sistemas de aire acondicionado. La Figura 6 muestra en la parte inferior las curvas horarias para la temporada de verano, que, a diferencia de la temporada invernal, presentan una mayor magnitud en las horas del día y el pico de la demanda diaria sin GD-FV se presenta alrededor de las 17 horas. No obstante, la misma figura, pero la curva correspondiente a la demanda con integración de GD-FV, muestra que una parte del consumo de electricidad entre las 7 de la mañana y las 19 horas se puede cubrir con sistemas de GD, lo que desplaza el pico de máxima demanda de la región dos horas hacia la noche, pasando de las 17 a las 19 horas.

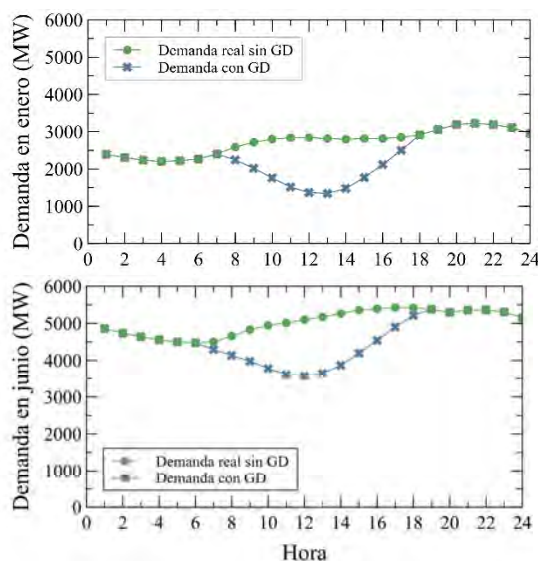


FIGURA 6. Perfil de demanda con y sin influencia de la GD-FV para la región Norte en el año 2033. Arriba se muestra el día a) 04 de enero. Abajo se muestra el día b). 25 de junio.

3.3 Noreste

La región noreste también está altamente influenciada por las condiciones climáticas de la zona. No obstante, dado que comprende los estados de Tamaulipas, una parte de Coahuila y todo el estado de Nuevo León, la demanda eléctrica de la región se ve afectada por la mezcla de estos dos factores: el clima y la actividad económica de la Zona Metropolitana de Monterrey. La Figura 7 muestra cómo en temporada de verano, la demanda de electricidad va creciendo durante las horas de la mañana y tarde hasta alcanzar un máximo a las 17 horas. Mientras tanto, en la temporada invernal donde las temperaturas máximas son significativamente menores que en verano, el perfil de la demanda permanece más estable a lo largo del día y alcanza un máximo alrededor de las 21 horas, principalmente asociado al consumo residencial; sin embargo, este máximo es en magnitud menor al presentado en verano. Así como sucede en la región norte, la generación distribuida ayuda a disminuir la curva de la demanda entre las 8 y las 19 horas, asimismo, desplaza ligeramente (una hora más tarde) el punto de máxima demanda para esta región durante la temporada de verano.

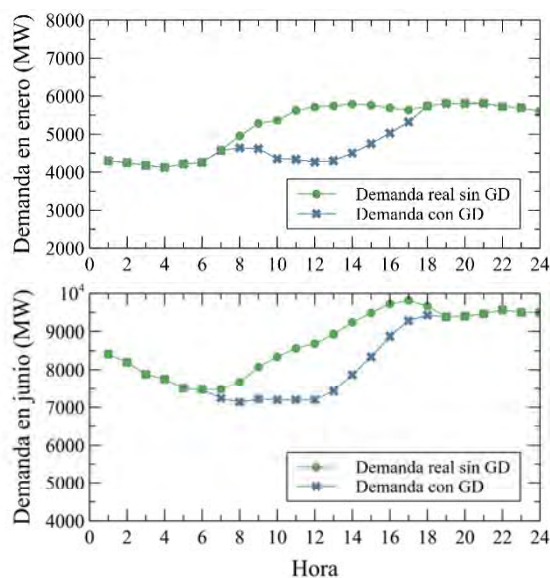


FIGURA 7. Perfil de demanda con y sin influencia de la GD-FV para la región Noreste en el año 2033. Arriba: se muestra el día a) 04 de enero. Abajo: se muestra el día b). 25 de junio.

3.4 Peninsular

La región peninsular comprende los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche. Si bien el clima no es tan extremo como en el área norte del país, también hay diferencias visibles en las curvas de demanda en las dos temporadas analizadas.

Al igual que en otras regiones, en la Figura 8 se observa una cobertura parcial de la demanda durante las horas de sol con ayuda de la generación distribuida; no obstante, es importante mencionar que, en el mes de enero, aunque la demanda no es muy grande, sí es grande la diferencia entre el punto mínimo y el máximo del día. Lo anterior quiere decir que la demanda a las 12 del día es de aproximadamente 750 MW, mientras que solo siete horas después, el pico alcanza una demanda de 1,575 MW; es decir, debe crecer al doble en ese tiempo.

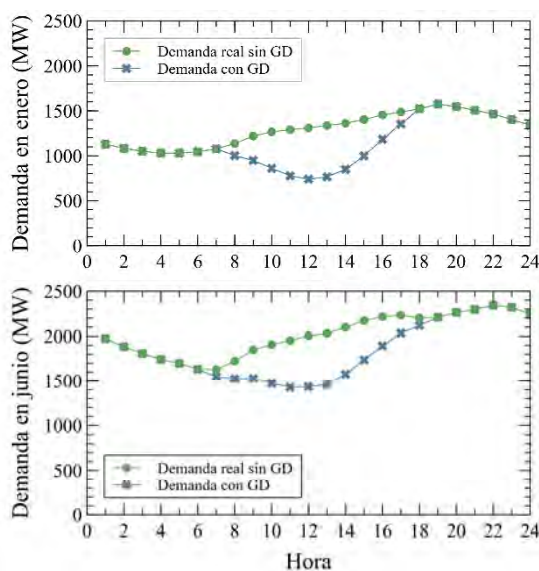


FIGURA 8. Perfil de demanda con y sin influencia de la GD-FV para la región Peninsular en el año 2033. Arriba se muestra el día a) 04 de enero. Abajo se muestra el día b) 25 de junio.

4. CONCLUSIONES

Si bien en la mayoría de los casos analizados se observa un beneficio derivado de la disminución en la magnitud de la curva de demanda diaria gracias a la incorporación de GD-FV, es importante destacar ciertos efectos que podrían representar desafíos para la operación del sistema eléctrico. En particular, durante la temporada de invierno la rampa entre el punto de menor demanda (alrededor de las 12:00 horas) y el de máxima demanda (entre las 17:00 y 18:00 horas) se acentúa de manera significativa. Dicho comportamiento implica que debe cubrirse una mayor cantidad de demanda en un intervalo de tiempo reducido, lo cual genera presiones adicionales para la planeación y el despacho de generación de electricidad. Por otro lado, aunque en algunos casos, como en las regiones del norte del país, la GD-FV contribuye a desplazar el pico de demanda una o dos horas más tarde, este nuevo pico no puede ser abastecido directamente con energía solar, dada su

naturaleza intermitente y limitada al horario diurno. Esta situación resalta la necesidad de desarrollar políticas públicas y marcos regulatorios en torno a la energía solar distribuida y a la energía solar en general. En particular, se vuelve relevante fomentar la incorporación de sistemas de respaldo y almacenamiento que permitan garantizar el suministro durante las horas de máxima demanda regional o nacional, asegurando así la confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico.

Finalmente, como parte de los análisis futuros, es importante considerar el impacto de la electromovilidad en la evolución de la demanda eléctrica. La incorporación masiva de vehículos eléctricos podría modificar de manera significativa las curvas de demanda, en especial si los patrones de carga se concentran en horarios de alta demanda. En este contexto, la generación distribuida fotovoltaica podría desempeñar un papel fundamental para mitigar dichos efectos, siempre y cuando se establezcan los incentivos regulatorios y económicos adecuados que promuevan la carga de vehículos principalmente durante las horas de sol. De esta manera, sería posible no solo reducir la presión sobre la red en horarios críticos, sino también aprovechar de manera más eficiente la energía renovable generada localmente.

REFERENCIAS

- [1]. International Energy Agency. *Renewables 2024, Analysis and forecast to 2030*. (2024). Obtenido de: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/electricity>
- [2]. Comisión Reguladora de Energía (CRE), 2024. *Solicitudes de interconexión de centrales eléctricas con capacidad menor a 0.5 MW*. Contratos de interconexión de pequeña y mediana escala y generación distribuida, estadísticas al segundo semestre de 2024.
- [3]. International Energy Agency. *Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources*. (2022).
- [4]. José F. C. Castro, Davidson C. Marques 1, Luciano Tavares, Nicolau K. L. Dantas, Amanda L. Fernandes and Pedro Rosas. *Energy and Demand Forecasting Based on Logistic Growth Method for Electric Vehicle Fast Charging Station Planning with PV Solar System* (2022). *Energies* 2022, 15, 6106. doi.org/10.3390/en15176106
- [5]. Modis Theodore. *Forecasting energy needs with logistics* (2018). doi.org/10.1016/j.techfore.2018.11.008
- [6]. Nele Rietmann, Beatrice Hügler, Theo Lieven. *Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and*



- the consequences for worldwide CO2 emissions* (2019). doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121038
- [7]. Huiming Duan, Xinyu Pang. *A multivariate grey prediction model based on energy logistic equation and its application in energy prediction in China* (2021). doi.org/10.1016/j.energy.2021.120716
- [8]. NASA, Data Access Viewer, consultado en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [9]. Duffie, John A., Beckman, William A. (2013), *Solar Engineering for Thermal Processes*, pág. 89.



María Fernanda García. Es Ingeniera en Energía por la Universidad Autónoma Metropolitana, con proyecto terminal en energía solar fotovoltaica. Entre 2019 y 2024 formó parte del equipo encargado de la operación de la Estrategia Ciudad Solar en la Secretaría de Desarrollo Económico de la Ciudad de México, donde contribuyó al diseño y ejecución de política pública local para el impulso de la energía solar y el desarrollo de proyectos a gran escala.

Actualmente cursa la Maestría en Ingeniería en Energía en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el área de Planeación Energética, y se desempeña como consultora senior en el programa de colaboración México-Dinamarca con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), donde participa en el proyecto de rutas de descarbonización del sector energético orientado al cumplimiento de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC).



Cecilia Martín del Campo. Es profesora en el Departamento de Energía Eléctrica y Sostenibilidad de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, CDMX, México. Ha sido también directora de la Unidad de Planeación Energética de esa institución. Es Ingeniera en Energía por la UAM, Ingeniera Nuclear por el Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Nucleares de Francia y tiene el Doctorado en Ciencias Físicas,

especialidad en Física de Reactores Nucleares de la Universidad de París XI, Francia. Es miembro de la Academia de Ingeniería de México, siendo actualmente la presidenta de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Nuclear. Forma parte de la Academia Mexicana de Ciencias, de la Academia Mexicana de Energía y de varios colegios profesionales de ingeniería. Es miembro del SNII (Nivel II). Su línea de desarrollo es la planeación energética sostenible. Cecilia ha sido contraparte de varios proyectos del OIEA-INPRO relacionados con sistemas nucleoelectrónicos y reactores modulares pequeños. Ha coordinado varios proyectos enfocados a la modelación del sector eléctrico y el sector energético para el análisis de escenarios de transición energética de largo plazo. Recientemente fue nombrada consejera independiente del Consejo de Administración de la CFE.





Aprovechamiento sustentable de los residuos de poliestireno expandido tipo unicel

GERARDO PÉREZ BRAVO¹, JOSÉ LUIS CONTRERAS LARIOS¹, JORGE F. RODRÍGUEZ GONZÁLEZ², CARLOS R. TAPIA MEDINA¹, JOSÉ MANUEL JURADO FLORES¹, RICARDO LÓPEZ MEDINA¹, BEATRIZ ZEIFERT³, DEYANIRA ÁNGELES BELTRÁN⁴

¹Departamento de Energía, CBI, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 420, Col. Nueva el Rosario, Ciudad de México, 02128, México

²Biomex Solutions, Mexicali 12, Col. Hipódromo, Alcaldía Cuauhtémoc, Ciudad de México, 06100, México

³Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, Escuela de Ingeniería Química e Industrias Extractivas-ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, Av. IPN, Col. Lindavista, Ciudad de México, 07738, México

⁴Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería-CBI, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 420, Col. Nueva el Rosario, Ciudad de México, 02128, México

Autor de Correspondencia: José Luis Contreras Larios (e-mail: jlcl@azc.uam.mx).

RESUMEN Dentro de los residuos de poliestireno que se generan en México se encuentra en gran cantidad el poliestireno expandido, mejor conocido en México como unicel. Una forma sustentable de tratar estos residuos es obtener su monómero estireno mediante pirólisis y una segunda opción es aplicar los residuos de poliestireno expandido, junto con otros componentes, en adhesivos. La pirólisis térmica y catalítica ya ha sido reportada por nuestro grupo de investigación y se han encontrado altos rendimientos de estireno (94%) obteniéndose también etilbenceno, tolueno y más pesados. El reactor que se estudió fue un reactor rotatorio semi-continuo calentado con gas LP y usando un catalizador de MgO. Por otra parte, en este proyecto de investigación se estudió la factibilidad de aprovechar los residuos de poliestireno expandido para obtener adhesivos, utilizando otros polímeros conjuntamente tales como el neopreno y el acetato de polivinilo con diferentes concentraciones, así mismo, se adicionó a las formulaciones de adhesivos una resina alquifenólica; se empleó tolueno como solvente. A estas formulaciones de adhesivos se les determinó su resistencia a la tensión y a la exfoliación en diversos materiales, tales como madera-madera, aluminio-aluminio, cuero-cuero, cuero-madera y cuero-cartón. Se compararon los resultados de estos parámetros con los de adhesivos comerciales. El adhesivo elaborado con 50% poliestireno y 50% acetato de polivinilo presentó la mejor resistencia a la tensión en madera-madera.

PALABRAS CLAVE: Adhesivos, Residuos de Poliestireno Expandido, Unicel, Reciclaje.

1. INTRODUCCIÓN

En el Inventario de Residuos Sólidos 2023 [1] que elaboró la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) del Gobierno de la Ciudad de México se reporta que durante ese año se generaron 12,454 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos. Por otra parte, en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos 2020 [2] que publicó la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) del Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos se especifica que el porcentaje en peso promedio de los residuos de poliestireno expandido es del 1.55% del total de residuos sólidos generados en México, por lo tanto se estima que en la Ciudad de México se originaron alrededor de 193.04 toneladas diarias de residuos de poliestireno expandido en el año 2023.

El poliestireno es abundante en los residuos que flotan en los océanos [3]. Como la mayoría de los polímeros sintéticos, el poliestireno se degrada muy lentamente, principalmente por el efecto de la radiación ultravioleta (UV) del sol, produciendo partículas cada vez más y más pequeñas, hasta fragmentos del polímero de tamaño micro o nanométrico, que pueden ser ingeridos fácilmente por los organismos de la vida silvestre marina, tales como mejillones, peces, aves marinas y ballenas. La ingestión de micropartículas de plástico puede dañar a los animales por la vía de la liberación de los monómeros del plástico y aditivos químicos tóxicos, como los ftalatos. La presencia de partículas microscópicas de plástico en peces y la vida marina silvestre es masiva y está bien documentada.

En este proyecto de investigación se propone aprovechar estos residuos de poliestireno expandido para producir adhesivos.



2. MATERIALES Y MÉTODOS

La pirólisis de los residuos de poliestireno expandido se llevó a cabo en el equipo cuya instalación se muestra en la Figura 1 en forma de diagrama, como se explicó en nuestro trabajo anterior.

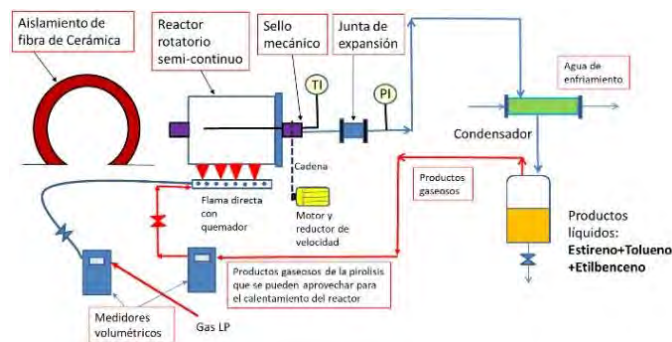


FIGURA 1. Diagrama del proceso del reactor rotatorio semi-continuo

El reactor, con operación semi-continua, se calentó con fuego directo mediante la combustión de gas LP. Para medir la temperatura en el centro del reactor en forma axial, se construyó un termopozo con un termopar deslizante, el cual se conectó a un indicador electrónico de temperatura. El reactor tipo cilíndrico se colocó sobre ocho rodamientos que permitían su libre rotación. El material de fabricación del reactor fue de acero al carbón con una capacidad de 5 L. Se instaló un motor de 1/4 de HP y un reductor de velocidad, con una velocidad de 1.6 rpm, para proporcionar la rotación del reactor a través de una cadena. Se instaló un sello mecánico y una junta de expansión a la salida de los productos gaseosos, en seguida se conectó un condensador de acero inoxidable para recuperar los productos líquidos. Se colocó un manómetro para monitorear la presión del sistema. Para recuperar la fase líquida se instaló un tanque separador líquido-gas a la salida del condensador. Con el fin de cuantificar la producción de gases no condensables de la pirólisis se colocó un medidor volumétrico de gas. Así mismo, se instaló otro medidor volumétrico de gas para cuantificar el consumo de gas LP. Con el fin de evitar pérdidas de calor, se colocó alrededor del reactor un aislamiento de fibra de cerámica con un espesor de 8.5 cm y encima otra capa de fibra de vidrio con un espesor de 4 cm. El sistema de enfriamiento consistió en una bomba de 1/2 HP que succionaba el agua contenida en un recipiente y se recirculaba al condensador.

En cada experimento se cargaron 460 g de residuos de poliestireno expandido en el reactor rotatorio, previamente fundidos a fin de reducir su volumen y eliminar el aire atrapado. Se realizaron experimentos sin emplear

catalizador y con MgO como catalizador, con una relación poliestireno:catalizador de 10:1.

Las muestras de productos líquidos obtenidas en cada experimento, tomadas cada 10 min, fueron analizadas con el cromatógrafo de gases Varian CP-3380, con un detector de ionización de flama y una columna capilar de 30 m x 0.25 mm ID x 0.25 μ m de polietilenglicol como fase estacionaria.

Adicionalmente, en este proyecto de investigación se estudió la aplicación del estireno y/o poliestireno para mejorar los adhesivos de neopreno que se estudiaron previamente en los siguientes proyectos terminales de Ingeniería Química en esta Universidad: “Evaluación de propiedades de adhesivos elastoméricos” [4] y “Síntesis de adhesivos a base de neopreno modificando la actividad taquificante con diversas resinas” [5]. En estos estudios no se alcanzó la capacidad de adherencia del adhesivo comercial (Resistol 5000). Para mejorar el adhesivo se pensó en adicionar poliestireno y/o estireno junto con una resina. Para este propósito, se llevaron a cabo diversas formulaciones de adhesivos de estireno, poliestireno, neopreno y acetato de polivinilo. En todas las formulaciones se utilizó tolueno como solvente. La resina utilizada consistió en una resina alquifenólica (proporcionada por la empresa Poli Resinas Hüttenes Albertus S. A. de C. V).

A las formulaciones de adhesivos de neopreno y estireno se les midió la viscosidad con un viscosímetro de Brookfield, modelo RVF, a una temperatura ambiente de 22°C.

Se efectuaron pruebas de resistencia a la tensión a cada formulación de adhesivo en diversos materiales, tales como madera-madera, aluminio-aluminio y cuero-cuero, de conformidad con el método estandarizado ASTM D 1002, a una velocidad de 1 mm/min y 6 días de secado, las pruebas con cuero se ejecutaron a una velocidad de 5 mm/min. Así mismo, se determinó la resistencia a la exfoliación a 180°, de conformidad con el método estandarizado ASTM D 429, en cuero-madera y cuero-cartón. Lo anterior, a fin de determinar cuál es la formulación de adhesivo que proporciona la mayor resistencia a la tensión y a la exfoliación. Además, se determinaron y se compararon los resultados de estos parámetros de adhesivos comerciales. Para efectuar estas pruebas de resistencia se utilizó la máquina universal de pruebas de resistencia mecánica Instron 5500R, (modelo 1125), que se presenta en la Figura 2.



FIGURA 2. Máquina Instron 5500R

El espécimen se colocaba con las mordazas como se observa en la Figura 3. La máquina Instron comenzaba a aplicar carga hasta llegar a una máxima carga y comenzaba a descender la misma, lo cual se observaba en una pantalla, se registraba en el software de la máquina y se generaba un archivo, eventualmente las tablillas adheridas se separaban. Para calcular la resistencia, se tomó la carga máxima alcanzada y se dividió entre el área de traslape de las tablillas.



FIGURA 3. Colocación del espécimen en la máquina Instron 5500R

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A manera de recordatorio, en la Tabla 1 se describen los resultados más importantes de los experimentos de la

pirólisis de residuos de poliestireno expandido efectuados con el reactor rotatorio con operación semi-continua.

TABLA 1. Rendimientos obtenidos con el reactor rotatorio semi-continuo

E	Temperatura	Re	%	Re	Observaciones
x	mp	ndi	Pes	ndi	
p	erat	mie	o	mie	
er	ura	nto	de	nto	
i	má	de	esti	de	
m	xim	ace	ren	esti	
e	a	ite	o	ren	
nt	(°C	(%	en	o	
o	)	pes	el	(%	
		o)	ace	pes	
			ite	o)	
R-2	484	89.36	87.26	77.98	Catalizador fresco
R-3	445	77.15	89.8	69.29	Catalizador fresco
R-4	450.2	85.85	91.08	78.2	Catalizador fresco
R-5	479.6	86.6	92.05	79.72	Catalizador fresco
R-6	504.1	97.49	92.87	90.54	Catalizador regenerado 1 vez
R-7	519.5	93.54	94.37	88.28	Catalizador regenerado 2 veces
R-8	528	99.23	95.08	94.35	Catalizador regenerado 3 veces
R-9	513.2	91.8	92.7	85.09	Catalizador regenerado 4 veces
R-10	507.9	89.08	96.88	86.31	Sin catalizador
R-11	438.4	91.54	92.76	84.91	Sin catalizador

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la viscosidad de las formulaciones de adhesivos elaborados con estireno y neopreno. No fue posible medir la viscosidad de la formulación del adhesivo obtenido con 10 g de neopreno y 90 g de estireno, toda vez que la medición quedaba fuera del rango de operación menor del viscosímetro, por lo que su viscosidad era inferior a 100 cP.

TABLA 2. Viscosidad de las formulaciones con estireno y neopreno

Masa Neopreno (g)	Masa Estireno (g)	Viscosidad (cP) 2 rpm	Viscosidad (cP) 4 rpm
90	10	1040000	865000
80	20	65700	-----
70	30	24750	23625
60	40	7200	7150
50	50	3600	3200
40	60	1000	960
30	70	520	460
20	80	110	110

Se observa que el adhesivo de neopreno y estireno a la concentración de 20 g de neopreno resulta en la misma viscosidad a las 2 velocidades empleadas, por lo que exhibe un comportamiento de fluido Newtoniano, por el contrario, a las concentraciones más altas de neopreno se advierte que la viscosidad es menor con el aumento de velocidad, lo que corresponde a un comportamiento de fluido no Newtoniano (líquido polimérico o pseudoplástico).



Los resultados de la resistencia a la tensión de las formulaciones de adhesivos con neopreno y poliestireno se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3. Resistencia a la tensión de las formulaciones con poliestireno

Masa Neopreno (g)	Masa Poliestireno (g)	Madera-madera (kg/cm ²)	Aluminio - aluminio (kg/cm ²)	Cuero-cuero (kg/cm ²)
20	5	5.2663	1.2297	5.7344
15	10	2.3191	4.1488	3.7425

En la Tabla 4 se detallan los resultados de la resistencia a la tensión de las formulaciones de los adhesivos elaborados con neopreno y estireno.

TABLA 4. Resistencia a la tensión de las formulaciones con estireno

Masa Neopreno (g)	Masa Estireno (g)	Madera-madera (kg/cm ²)	Aluminio - aluminio (kg/cm ²)	Cuero-cuero (kg/cm ²)
90	10	5.1751	0.4517	1.2118
80	20	2.1429	0.4325	2.6365
70	30	1.6811	0.8182	3.2553
60	40	1.51599	0.93139	3.7924
50	50	3.3721	2.0312	2.2319
40	60	1.5202	1.6959	2.7913
30	70	2.5002	1.94599	4.7737
20	80	1.0944	5.8311	4.8925
10	90	Se desprendió antes de la prueba	3.6786	1.1169
Adhesivo comercial		26.3764	2.3677	11.052

A las formulaciones realizadas con diferentes porcentajes de poliestireno, neopreno y resina se les midió la resistencia a la tensión, de conformidad con el método estandarizado ASTM D 1002. En la Tabla 5 se enlistan los resultados de la resistencia a la tensión con madera de estos adhesivos. Se especifica la masa del adhesivo en los especímenes, que tiene que ver con la resistencia a la tensión medida, cuando se le aplicó poca cantidad de adhesivo se desprendió antes de empezar la prueba, por lo que se repitieron las pruebas, incrementando la cantidad del adhesivo. Se puede percibir que la formulación con 40% poliestireno, 50% neopreno y 10% resina supera en resistencia a la tensión al Resistol 5000, aunque se debe tomar en cuenta que la cantidad del Resistol 5000 es 6 veces menor.

TABLA 5. Resistencia a la tensión con madera de los adhesivos

Adhesivo	Masa del adhesivo (g)	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)
Resistol 5000	0.0136	3.56
100% PS	0.0125	0.31
90% PS 10% Resina	0.0083	0.775

80% PS 10% Neopreno	0.0172	Se desprendió antes de la prueba
10% Resina		
60% PS 30% Neopreno	0.0153	Se desprendió antes de la prueba
10% Resina		
40% PS 50% Neopreno	0.0075	Se desprendió antes de la prueba
10% Resina		
20% PS 70% Neopreno	0.0214	Se desprendió antes de la prueba
10% Resina		
80% PS 10% Neopreno	0.115	3.329
10% Resina		
60% PS 30% Neopreno	0.0978	1.878
10% Resina		
40% PS 50% Neopreno	0.0819	6.634
10% Resina		
20% PS 70% Neopreno	0.1087	3.357
10% Resina		

En la Tabla 6 se especifican los resultados de la resistencia a la tensión con cuero de los adhesivos con diferentes porcentajes de poliestireno, neopreno y resina.

TABLA 6. Resistencia a la tensión con cuero de los adhesivos

Adhesivo	Masa del adhesivo (g)	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)
Resistol 5000	0.0298	3.1
100% PS	0.0399	1.55
90% PS 10% Resina	0.0395	1.55
80% PS 10% Neopreno	0.0312	0.31
10% Resina		
60% PS 30% Neopreno	0.0326	1.55
10% Resina		
40% PS 50% Neopreno	0.0256	1.55
10% Resina		
20% PS 70% Neopreno	0.0211	3.357
10% Resina		

En la Tabla 7 se puntualizan los resultados de la resistencia a la tensión con aluminio de los adhesivos con diferentes porcentajes de poliestireno, neopreno y resina.

TABLA 7. Resistencia a la tensión con aluminio de los adhesivos

Adhesivo	Masa del adhesivo (g)	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)
Resistol 5000	0.0684	1.283
100% PS	0.0823	0.418
90% PS 10% Resina	0.0484	0.403
80% PS 10% Neopreno	0.034	0.472
10% Resina		
60% PS 30% Neopreno	0.0346	0.403
10% Resina		
40% PS 50% Neopreno	0.0537	0.403
10% Resina		
20% PS 70% Neopreno	0.0316	0.403
10% Resina		

En la Tabla 8 se especifican los resultados de la resistencia a la exfoliación con cartón y cuero de los adhesivos con diferentes porcentajes de poliestireno,



neopreno y resina. Se advierte que la formulación con 20% poliestireno, 70% neopreno y 10% resina supera en resistencia a la exfoliación al adhesivo comercial amarillo pero no es mejor que el Resistol 5000.

TABLA 8. Resistencia a la exfoliación con cartón y cuero de los adhesivos

Adhesivo	Masa del adhesivo (g)	Resistencia a la exfoliación (kg/cm ²)
Resistol 5000	0.1192	0.928
100% PS	0.2184	0.325
90% PS 10% Resina	0.1593	0.313
80% PS 10% Neopreno	0.1451	0.331
10% Resina		
60% PS 30% Neopreno	0.1084	0.359
10% Resina		
40% PS 50% Neopreno	0.2204	0.348
10% Resina		
20% PS 70% Neopreno	0.1814	0.637
10% Resina		
Adhesivo comercial transparente	0.0729	0.226
Adhesivo comercial amarillo	0.1119	0.556

En la Tabla 9 se describen los resultados de la resistencia a la exfoliación con madera y cuero de los adhesivos con diferentes porcentajes de poliestireno, neopreno y resina.

TABLA 9. Resistencia a la exfoliación con madera y cuero de los adhesivos

Adhesivo	Masa del adhesivo (g)	Resistencia a la exfoliación (kg/cm ²)
Resistol 5000	0.0506	1.091
100% PS	0.1532	0.386
90% PS 10% Resina	0.1107	0.277
80% PS 10% Neopreno	0.1651	0.289
10% Resina		
60% PS 30% Neopreno	0.1694	0.167
10% Resina		
40% PS 50% Neopreno	0.1173	0.254
10% Resina		
20% PS 70% Neopreno	0.1061	0.502
10% Resina		
Adhesivo comercial transparente	0.0917	0.466
Adhesivo comercial amarillo	0.0816	1.443

En la Tabla 10 se pormenorizan los resultados de la resistencia a la tensión con madera-madera del adhesivo con 100% poliestireno expandido, 50% poliestireno expandido - 50% acetato de polivinilo, adhesivo blanco comercial y adhesivo 5000. Se observa que el efecto de la combinación del poliestireno expandido con el acetato de polivinilo genera un adhesivo con una resistencia a la tensión mayor

que a sus componentes por separado. El componente principal del adhesivo blanco es el acetato de polivinilo. Por lo anterior, es factible producir un adhesivo con residuos de poliestireno expandido con una resistencia a la tensión mayor a los adhesivos que se comercializan actualmente y es posible mejorarlo aún más con un trabajo a futuro. Se observó que el adhesivo en el cual se mezcló 50% en masa de poliestireno expandido, disuelto en tolueno, con 50% en masa del acetato de polivinilo, después de un tiempo se separó en dos fases líquidas, debido a que son insolubles. Esto se puede solucionar añadiendo un surfactante, por lo que se adicionó 5% en masa de cloruro de benzalconio y, de esta manera, ya no se separaron dos fases líquidas.

TABLA 10. Resistencia a la tensión con madera-madera de los últimos adhesivos

Adhesivo	Resistencia a la tensión (kg/cm ²)
100% poliestireno	32.5
50% poliestireno-50% acetato de polivinilo	52.47
Adhesivo blanco comercial	29.00
Adhesivo comercial 5000	6.62

En la Figura 4 se exhibe un ejemplo de las gráficas obtenidas en la determinación de la resistencia a la tensión con la máquina Instron 5500R, modelo 1125. Una probable explicación de la forma de estas gráficas es que se debe a que los bordes del área traslapada resisten un mayor esfuerzo y por la elasticidad del adhesivo, de acuerdo con Landrock [6].

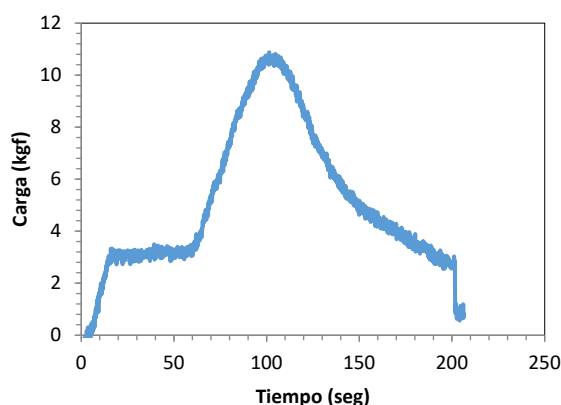


FIGURA 4. Carga contra tiempo (s) en la medición de la resistencia a la tensión

4. CONCLUSIONES

- Es posible producir un adhesivo comercial a partir de residuos de poliestireno expandido con una resistencia superior a los adhesivos que existen



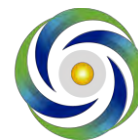
actualmente en el mercado. El adhesivo elaborado con 50% poliestireno expandido y 50% acetato de polivinilo tuvo mejor desempeño que sus componentes por separado, esto es, mayor resistencia a la tensión en madera-madera.

- En las pruebas de resistencia a la tensión con aluminio-aluminio las formulaciones de adhesivos realizadas con poliestireno y neopreno en este proyecto fueron mejores que el adhesivo comercial, sin embargo, en las pruebas madera-madera y cuero-cuero no fueron superiores al adhesivo comercial.
- Los adhesivos de neopreno y estireno a muy bajas concentraciones presentaron un comportamiento de fluido Newtoniano, por el contrario, a altas concentraciones de neopreno se comportaron como un fluido no Newtoniano (líquido polimérico o pseudoplástico).

REFERENCIAS

- [1] Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), Gobierno de la Ciudad de México (2024). *Inventario de Residuos Sólidos 2023*, México, pp. 18.
- [2] Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos (2020) *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2020*, México, p. 23.
- [3] Lebreton L, Slat B, Ferrari F, Sainte-Rose B, Aitken J, Marthouse R, Hajbane S, Cunsolo S, Schwarz A, Levivier A, Noble K, Debeljak P, Maral H, Schoeneich-Argent R, Brambini R, Reisser J, *Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic*. Scientific Reports, 8:4666 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-22939-w.
- [4] Cabrera Torres, S. A. *Evaluación de propiedades de adhesivos elastoméricos*. Proyecto terminal en Ingeniería Química. UAM Azcapotzalco, (1994). México.
- [5] Ruiz Tinajero, D. B., et al. *Síntesis de adhesivos a base de neopreno modificando la actividad taquificante con diversas resinas*. Proyecto terminal en Ingeniería Química. UAM Azcapotzalco, (1995). México.
- [6] Landrock, A. H. *Adhesives Technology Handbook*. Editorial Elsevier, (2015). Londres, Reino Unido, pp. 1-13.





Producción de H₂ por reformación catalítica de glicerol o etanol separando CO₂

ANABEL FIGUEROA¹, JOSÉ LUIS CONTRERAS¹, JOSÉ MANUEL TRIANO¹,
NAOMI GONZALEZ¹, ISRAEL PALA ROSAS¹, RICARDO LÓPEZ MEDINA¹, JOSÉ ORTIZ
LANDEROS²

¹Laboratorio del Área de Procesos de la Industria Química, Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Ciudad de México, México, CP 02200.

²ESIQIE-Instituto Politécnico Nacional. Av. Luis Enrique Erro/Sn., Gustavo A. Madero, México, CP 07738

Autor de Correspondencia: (e-mail: aaragon9026@gmail.com)

RESUMEN

El cálculo de la producción de hidrógeno a partir del proceso de reformación del glicerol con vapor de agua es termodinámicamente factible, ya sea utilizando el método de cálculo de minimización de energía libre de Gibbs total, se encontró que los mejores rendimientos al equilibrio de H₂, CH₄, CO y CO₂ se logran a 700°C. Al aumentar la presión total, se encontró que el rendimiento a H₂ disminuye, por el contrario, si disminuye la presión, se tienen buenos rendimientos a 1 atm a temperaturas entre 600-700 °C. Se encontró que mediante esta reacción se favorece la producción de CO, por lo que se propuso una siguiente etapa de metanación con catalizadores de Ni/CeO₂. Se realizó el análisis termodinámico de la reacción de metanación, empleando el simulador Aspen Plus, se encontró que a temperaturas debajo de los 250°C es favorecida la producción de metano.

globales. Algunos de los métodos de producción de H₂ más relevantes son: reformado con vapor de gas natural, gasificación de carbón, electrólisis del agua a través de energías eólica y solar y gasificación de biomasa termoquímica del desdoblamiento del agua y electrólisis a alta temperatura (Cortright et al., 2002). El proceso de reformado con agua de alcoholes derivados de la fermentación, así como compuestos de la biomasa ha demostrado ser sustentable y la tecnología está migrando hacia abandonar el proceso a partir de fuentes fósiles.

1.1. Reacciones de glicerol

La reacción de reformado de glicerol con vapor de agua se lleva a cabo en dos etapas [Davda et al.(2005) y Shabaker, et al, (2004)]. La primera es el rompimiento de los enlaces C-C seguido por la reacción llamada “water gas shift” produciendo H₂ y CO₂. En la realidad, se llevan a cabo varias reacciones y algunos subproductos pueden ser: acetol, etanol, ácido acético, hidroxiacetaldehído, metano y CO [Hirai et al. (2005)]

PALABRAS CLAVE: reformado, hidrógeno, CO₂, metanación, separación.

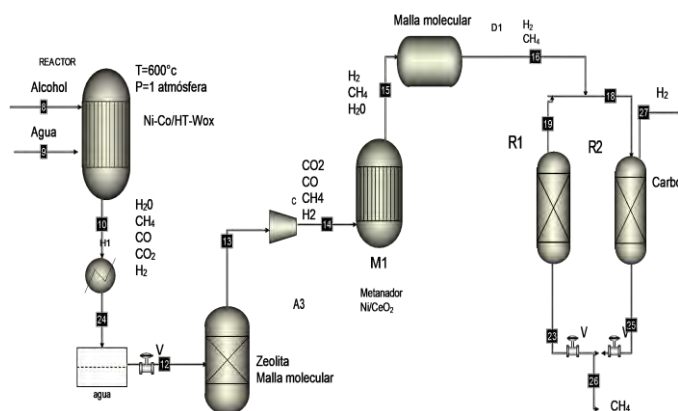
1. Introducción

Algunas de las ventajas de la economía del hidrógeno pueden ser resumidas como sigue: (i) Seguridad energética mediante la reducción del consumo de petróleo, (ii) Sostenibilidad aprovechando las fuentes de energías renovables, (iii) Menos contaminación y mejor calidad del aire urbano, produciendo casi cero carbono, hidrocarburos, NOx y emisiones en el punto de uso, y (iv) viabilidad económica dando forma a los futuros mercados energéticos

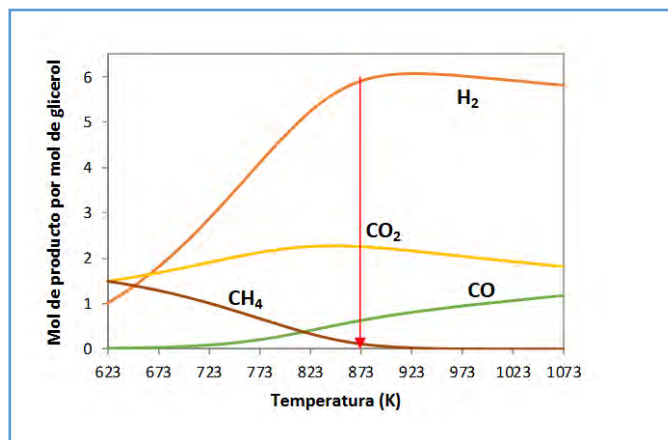
1)	$C_3H_8O_3 + 3H_2O \rightarrow 3CO_2 + 7H_2$	(reacción global)
2)	$C_3H_8O_3 + 0.5O_2 \rightarrow 2CO + CO_2 + 4H_2$	(oxidación glicerol)
3)	$C_3H_8O_3 + O_2 \rightarrow CO + 2CO_2 + 4H_2$	
4)	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	(metanación)
5)	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	(metanación)
6)	$CO_2 + CH_4 \rightarrow 2H_2 + 2CO$	(reformado de metano CO ₂)
7)	$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$	(WGS)
8)	$H_2 + CO \rightarrow C + H_2O$	(Coque)



Para el cálculo de la minimización de la energía libre de Gibbs tiene las siguientes ventajas como son: (i) No es necesario conocer las posibles reacciones químicas que se llevan a cabo, (ii) No existe ninguna divergencia dentro del cálculo y (iii) Una estimación exacta de la composición al equilibrio inicial no es necesaria (García Laborde, 1991)



El sistema (figura 1) consiste en realizar la reacción de reformado de glicerol para posteriormente pasar los productos a una trampa de zeolita y malla molecular, posterior pasarlo a una reacción de metanación con catalizadores de Ni/CeO₂ y finalmente a unos lechos con carbón activado para separar las corrientes de H₂ y CH₄



2.1. Efecto en la temperatura

En la Figura 2, se muestra el efecto de la temperatura sobre la composición de equilibrio de los productos de la reacción a 1 atm. Claramente se observa un mayor rendimiento de H_2 a altas temperaturas 973 K (700°C) y también se encontró un mayor rendimiento de CO. Por su parte la producción de CO_2 pasa por un máximo a 823K (550°C) y disminuye al aumentar la temperatura, este comportamiento podría ser atribuido a la reformación de CH_4 con CO_2 como lo demuestra la reacción No. (5) y como ha sido reportado (Fatsikostas et al., 2002)

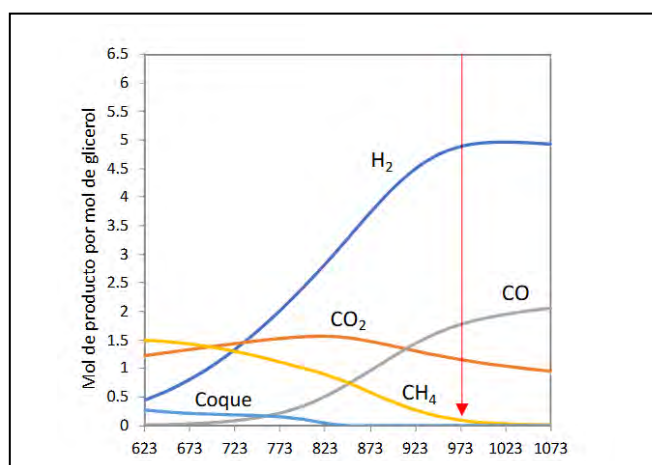


FIGURA 3 . Mol de producto por mol de glicerol vs Temperatura

2.2. Efecto de la relación agua/glicerol

En la Figura 3, se observa la variación de moles de H_2 por mol de glicerol cuando la relación molar agua/glicerol es de 10/1. Este comportamiento indica que a una mayor relación de agua/glicerol que la estequiométrica de 3/1, tal como la de 10/1, se obtiene una mayor proporción de H_2 .

2. Efecto de la presión

En la figura 4 el efecto de la presión sobre la producción de moles de H_2 por mol de glicerol muestra que a bajas presiones (1 atm) se obtienen mejores rendimientos que a altas presiones. A altas presiones (10 atm), se observa que, en todo el intervalo de temperatura, se obtiene un rendimiento menor de H_2 en comparación con el proceso a 1 Atm (Figura 1), alcanzando un máximo de 4 mol de H_2 /mol de glicerol a 1073 K

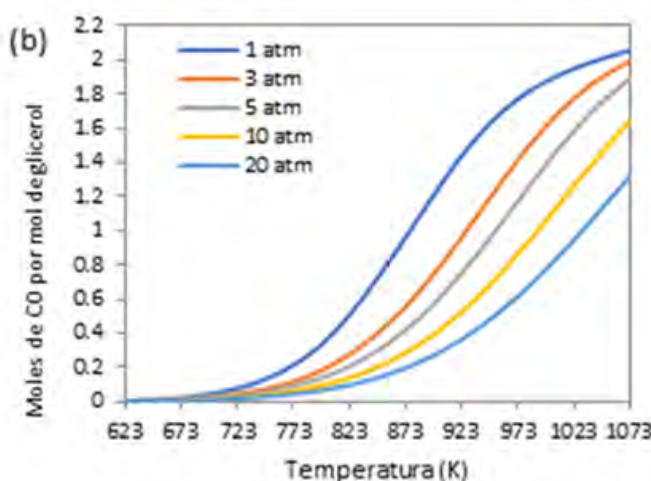


FIGURA 4. Efecto de la presión en la reacción de reformado de glicerol

3. RESULTADOS DE REACCIÓN METANACIÓN

Para la siguiente etapa que es la reacción de metanación. También se realizó la simulación de la reacción de metanación empleando el modelo NTRL variando la temperatura y la presión.

5.1. Reacción de metanación de CO_2

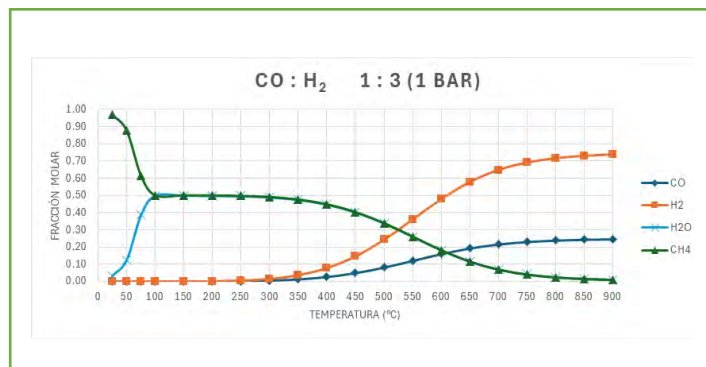


FIGURA 5. Efecto de la presión en la reacción de CO

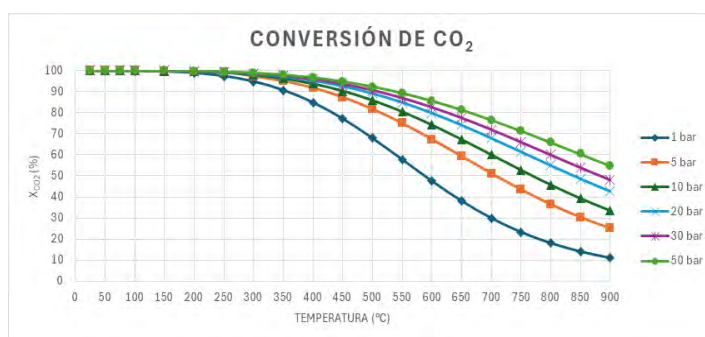


FIGURA 6. Efecto de la presión en la reacción de CO_2

Para la reacción de metanación de CO_2 se observa que un aumento en la temperatura favorece la producción de hidrógeno (Figura 5). Existe un máximo de conversión de CH_4 a partir de los 25°C, cercano a 97%.

Al aumentar la temperatura se observa una disminución notoria del CH_4 a partir de los 100°C. La producción de H_2 va aumentando, pero muy poco a no más del 20% a partir de los 400°C. El consumo de CO_2 es más que evidente, sin embargo, el aumento de la temperatura inhibe la producción de más CH_4 por lo que se observa alta fracción molar de CO_2 a temperaturas mayores de 500°C.

En la figura 6 se observa que la conversión de CO_2 disminuye al aumentar la temperatura y aumenta con el incremento de la presión. A 1 bar de presión la conversión de CO_2 empieza a disminuir a partir de los 300°C . Sharifian, S., Miltner, M., & Harasek, M. (2016)

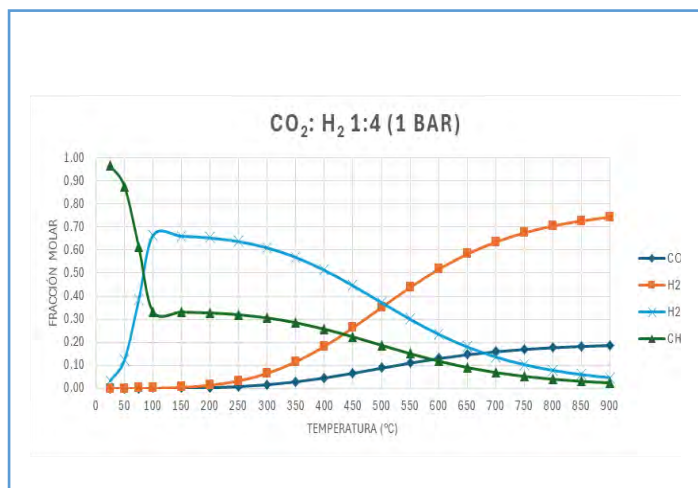


FIGURA 7 Efecto de la presión en al reacción de metanación

5.1. Reacción de metanación de CO

Se observa que en la Figura 7 hay producción de metano a bajas temperaturas desde 25°C y la producción de H_2 empieza a favorecerse a altas temperaturas. La producción de H_2 empieza a ser notable a partir de los 350°C , sin embargo empieza a producirse CO a los 350°C

En la Figura 8 se observa que se mantiene una conversión de 100% a bajas temperaturas y a mayores presiones se mantiene. Sharifian, S., Miltner, M., & Harasek, M. (2016)

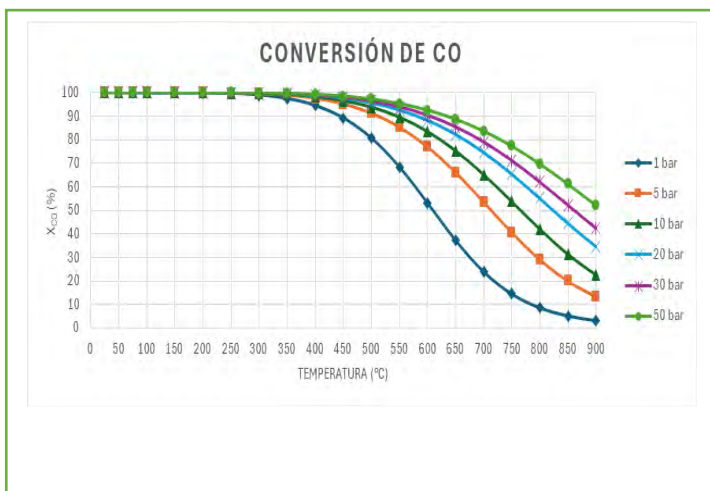


FIGURA 8 . Efecto de la presión en al reacción de reformado de glicerol

6. CONCLUSIONES

Es posible aprovechar el glicerol producido en el proceso de fabricación de biodiesel convirtiéndolo en H_2 a partir del proceso de reformación del glicerol con vapor de agua, el cual es termodinámicamente factible. Por medio del método de cálculo de minimización de energía libre de Gibbs total, se obtuvieron los resultados de rendimientos al equilibrio de H_2 , CH_4 , CO y CO_2 , donde se observó la mayor producción de H_2 a 600°C . También se encontró que el rendimiento a H_2 disminuye con el aumento en la presión total siendo favorable realizar la reacción a presión de 1 atm y que el aumento de la temperatura favorece la producción de H_2 hasta temperaturas de $600\text{--}700^\circ\text{C}$. Se encontró un máximo en la producción de CO_2 a 823K (550°C) relacionado con la reacción de CH_4 y CO_2 . Se encontró que un aumento en la relación molar agua/glicerol en la corriente de alimentación, se favorece la producción de H_2 en todo el intervalo de temperatura. Las mejores condiciones de operación del reactor será operar a una relación agua/glicerol de 10 a una temperatura de 600°C y a una presión de 1 atm. Para el análisis termodinámico de la reacción de metanación del CO , del CO_2 con H_2 indica que a bajas temperaturas 100°C y presiones de 10 bar se tiene una buena producción de metano



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Metropolitana y al CONAHCYT por el apoyo otorgado.

REFERENCIAS

Artículos

- [1]. Acar, C., & Dincer, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *International journal of hydrogen energy*, 39(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.060>
- [2]. Adhikari, S., Fernando, S., Gwaltney, S. R., To, S. F., Bricka, R. M., Steele, P. H., & Haryanto, A. (2007). A thermodynamic analysis of hydrogen production by steam reforming of glycerol. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(14), 2875-2880. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.03.023>
- [3]. Contreras, J. L., Tapia, C., Fuentes, G. A., Nuño, L., Quintana, B., Salmones, J., Zeifert, B. & Córdova, I. (2014). Equilibrium composition of ethanol steam reforming reaction to produce H₂ applied to Ni, Co and Pt/hydrotalcite-WO_x catalysts. *International journal of hydrogen energy*, 39(29), 16608-16618. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.080>.
- [4]. Cortright, R. D., Davda, R. R., & Dumesic, J. A. (2002). Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water. *Nature*, 418(6901), 964-967. <https://doi.org/10.1038/nature01009e>.
- [5]. Davda RR, Shabker JW, Huber GW, Cortright RD, Dumesic JA. (2005). A review of catalytic issues and process conditions for renewable hydrogen and alkanes by aqueous phase reforming of oxygenated hydrocarbons over supported metal catalysts. *Appl. Catal B: Environ*: 56:171-86. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.04.027>.
- [6].

Anabel Figueroa Aragón. Doctorante en Ingeniería de Procesos (UAM-Azcapotzalco, beca CONACyT) y Maestría en Ciencias en Ingeniería Química (Universidad Iberoamericana, beca CONACyT). Ingeniera Química por la Universidad Autónoma Metropolitana.



Destaca por publicaciones en el *International Journal of Hydrogen Energy*, participación en congresos globales, +3 años en industria farmacéutica y docencia. Actualmente dirige tesis de licenciatura, consolidando su rol en la formación de nuevos profesionales.





Innovación en la formación para ingeniería con simulación computacional y manufactura aditiva 3D

JESÚS V. GONZÁLEZ-SOSA¹, YADIRA ZAVALA-OSORIO²,
ENRIQUE ÁVILA-SOLER³

¹Facultad de Estudios Superiores Aragón UNAM, Ingeniería Mecánica, CDMX, 57171, México.

²Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Sistemas, CDMX, 02128, México.

³Instituto Tecnológico Gustavo A. Madero, Ingeniería Industrial, CDMX, 07470, México.

Autor de Correspondencia: Jesús Vicente González Sosa (e-mail: vicentegonzalez60@aragon.unam.mx).

RESUMEN Este trabajo propone una innovación para la formación en ingeniería mediante la integración de simulación computacional y manufactura aditiva 3D en los programas académicos, con el objetivo de fortalecer competencias teóricas y prácticas de los estudiantes. La propuesta se justifica por la necesidad de modernizar los métodos educativos para responder eficazmente a las exigencias del mercado laboral actual, promoviendo la creatividad y la originalidad en los procesos de formación profesional. El problema identificado radica en la brecha entre la formación académica tradicional y las tecnologías emergentes en la industria. Para atender esta situación, se diseñaron módulos que combinan simulaciones digitales con ejercicios prácticos de impresión 3D en un entorno híbrido, en los que el alumnado diseña, simula y fabrica componentes usando software especializado e impresoras 3D. La evaluación se llevó a cabo con análisis de rendimiento y comparación con métodos convencionales, evidenciando mejoras significativas en la comprensión técnica, habilidades de diseño y resolución de problemas, además de mayor motivación. Se concluye que esta integración contribuye a reducir la distancia entre la academia e industria y permite una mejor preparación de los futuros ingenieros frente a desafíos reales. Se sugiere ampliar el currículo, incorporar tecnologías emergentes y fortalecer los vínculos con el sector productivo, promoviendo una enseñanza innovadora, alineada con tendencias globales.

PALABRAS CLAVE: Educación, innovación, manufactura, simulación, tecnología.

1. INTRODUCCIÓN

La integración de la simulación computacional y la manufactura aditiva 3D está transformando la formación en ingeniería, permitiendo a los estudiantes adquirir habilidades teóricas y prácticas avanzadas. Este enfoque innovador fortalece la preparación de futuros ingenieros para afrontar los desafíos tecnológicos del siglo XXI.

En la fabricación aditiva de metales, es fundamental contar con métodos de simulación rápidos y eficientes para aprovechar al máximo estos procesos, especialmente en la creación de componentes con microestructuras personalizadas mediante fusión láser en lecho de polvo (LPBF). Debido a su naturaleza multiescala, las aproximaciones existentes suelen simplificar el proceso, como modelar el calentamiento por capas, para hacer viables las simulaciones a escala de pieza. En este artículo, se propone un enfoque resuelto por escaneo que modela de manera coherente la trayectoria láser en un modelo termo-microestructural acoplado para LPBF. Los resultados muestran que esta metodología permite predecir cómo la estrategia de escaneo influye en la microestructura, logrando así un control más preciso sobre las propiedades finales de los componentes [1].

El artículo [2] presenta una aproximación innovadora para crear colores vibrantes mediante nanoestructuras en procesos de fabricación aditiva. La metodología computacional permite diseñar patrones nanométricos precisos, abriendo nuevas posibilidades en la personalización y estética de objetos impresos. El material suplementario proporciona detalles técnicos que enriquecen la comprensión del proceso y sus aplicaciones potenciales. Sin duda, este avance representa un paso importante hacia la integración de la nanociencia en la fabricación digital.





En [3] destaca la importancia de las tecnologías CAD/CAM/CAE y otras técnicas de fabricación digital en el avance del desarrollo de productos en América Latina. Estas herramientas permiten optimizar procesos, reducir costos y mejorar la precisión en la creación de prototipos y productos finales. Fomentando la innovación y la competitividad de las empresas latinoamericanas en mercados globales. La adopción de estas tecnologías también impulsa la formación de talento especializado y la integración de cadenas productivas más eficientes. Sin embargo, aún persisten desafíos relacionados con la inversión y la capacitación en la región. En conjunto, el uso de estas técnicas representa una oportunidad clave para potenciar el crecimiento industrial en América Latina.

Los autores en el artículo [4] mencionan la importancia de la manufactura aditiva como pilar fundamental en la transformación de la industria 4.0, resaltando su impacto en la innovación y eficiencia en ingeniería. A través de un análisis bibliométrico, se evidencia el crecimiento y la tendencia de investigaciones en esta área, subrayando su relevancia futura. Sin duda, la integración de estas tecnologías potenciará el desarrollo de soluciones más personalizadas y sostenibles en el sector industrial.

La manufactura aditiva está transformando los sistemas productivos al ofrecer mayor precisión, personalización y reducción de desperdicios. Esta tecnología permite una fabricación más eficiente y flexible, adaptándose rápidamente a las demandas del mercado. Sin duda, la impresión 3D se posiciona como un impulsor clave para la innovación en la industria moderna [5].

Es importante resaltar que [6] presenta una visión integral sobre cómo la simulación puede mejorar la eficiencia y precisión en la fabricación aditiva. Destaca la importancia de desarrollar modelos que permitan predecir y optimizar parámetros clave, reduciendo errores y desperdicios. La integración de técnicas de control avanzado contribuye a obtener resultados más consistentes y de alta calidad en las piezas producidas. El enfoque en la simulación como herramienta de apoyo para la toma de decisiones es fundamental para avanzar en la automatización y personalización de los procesos. En conjunto, el trabajo subraya el potencial de la modelación para transformar la manufactura aditiva en una tecnología más confiable y eficiente.

Un avance significativo en la creación de órtesis protectoras pasivas mediante manufactura aditiva destaca la importancia para personalizar y mejorar la protección en aplicaciones médicas [7]. Esta innovación promete optimizar los procesos de fabricación ofreciendo soluciones más eficientes y adaptadas a las necesidades de los pacientes.

Este trabajo complementa las investigaciones previas al aplicar la simulación computacional y la manufactura aditiva en un estudio de caso, con el propósito de analizar cómo estas herramientas pueden ser implementadas en la enseñanza y el aprendizaje de la ingeniería en las comunidades académicas.

La siguiente sección, dedicada a la metodología, resulta fundamental al describir los procedimientos y técnicas empleados para recopilar y analizar los datos, lo cual asegura la reproducibilidad del estudio y la validez de los resultados obtenidos.

2. METODOLOGÍA

La metodología para desarrollar este artículo de investigación inicia con una revisión exhaustiva del estado del arte en simulación computacional y manufactura aditiva 3D, con el objetivo de identificar las brechas existentes en la formación en ingeniería. A partir de este análisis, se diseña un marco teórico que sustenta la integración de estas tecnologías en los programas académicos, estableciendo objetivos claros y criterios de evaluación. Este enfoque permite fundamentar la propuesta y definir los módulos de simulación, así como los ejercicios prácticos a implementar.

Se desarrolla un entorno de aprendizaje híbrido que combina clases teóricas, laboratorios virtuales y prácticas presenciales. A través de casos de estudio diseñados específicamente, los estudiantes diseñan, simulan y fabrican componentes utilizando software especializado e impresoras 3D, fomentando el aprendizaje activo. La implementación se lleva a cabo en un grupo piloto, permitiendo recopilar datos relevantes sobre el desarrollo del proceso y el nivel de participación estudiantil.

Se realiza una evaluación integral mediante análisis cuantitativos y cualitativos, comparando los resultados con métodos tradicionales de enseñanza. Para validar la efectividad de la propuesta, se recopilan métricas de rendimiento académico, motivación estudiantil y habilidades adquiridas. Los hallazgos son analizados y discutidos críticamente, permitiendo identificar áreas de mejora y proponer futuras líneas de investigación orientadas a fortalecer la integración de tecnologías emergentes en la formación en ingeniería.

En este contexto, la figura 1 presenta las etapas requeridas para el análisis de casos de estudio representativos en la formación de ingeniería, utilizando herramientas computacionales e impresión 3D.





FIGURA 1. Etapas de desarrollo en la metodología para aplicar simulación computacional y manufactura aditiva en casos de estudio.

A continuación, se describen las etapas identificadas en la figura 1.

2.1. Identificación del problema

Es necesario actualizar los programas de formación en ingeniería para incorporar tecnologías emergentes como la simulación computacional y la manufactura aditiva 3D, con el propósito de preparar a los estudiantes para enfrentar los desafíos actuales en los ámbitos académicos, investigación y profesionales.

2.2. Diseño del caso de estudio

El caso de estudio consiste en un llavero personalizado fabricado con impresión 3D, demostrando cómo la simulación computacional y la manufactura aditiva facilitan el diseño, optimización y producción rápida de objetos innovadores para la formación en ingeniería. Esta experiencia manifiesta el potencial de estas tecnologías para fomentar la creatividad y el aprendizaje práctico en entornos educativos.

En la figura 2 se observa el caso de estudio diseñado mediante un modelador de CAD para este trabajo.

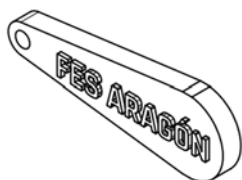


FIGURA 2. Caso de estudio, llavero 3D.

En este caso de estudio, se pueden utilizar diversas herramientas, tanto para la evaluación del producto final como para su fabricación mediante distintos procesos de manufactura. Entre estos métodos se encuentran la impresión 3D, la inyección de plásticos, el maquinado CNC y el maquinado convencional con fresadora.

La siguiente etapa es crucial para evaluar la mejora de este producto e identificar las áreas de oportunidad.

2.3. Implementación de simulación e I3D

En esta etapa se visualizan escenarios que permiten mejorar las condiciones de fabricación de un espécimen con estas características, utilizado como caso de estudio.

Se pueden llevar a cabo diversas simulaciones, como análisis estáticos y térmicos (temperatura y transferencia de calor) mediante el método de elementos finitos (FEM). En las figuras 3 y 4 se muestran dos ejemplos: una simulación estática basada en elementos finitos y otra relacionada con la fabricación asistida por software de impresión 3D. Estas simulaciones permiten evaluar el comportamiento térmico y estructural de los componentes bajo distintas condiciones. La integración de estas técnicas contribuye a un diseño más preciso y eficiente, optimizando los procesos y mejorando la calidad de los productos.

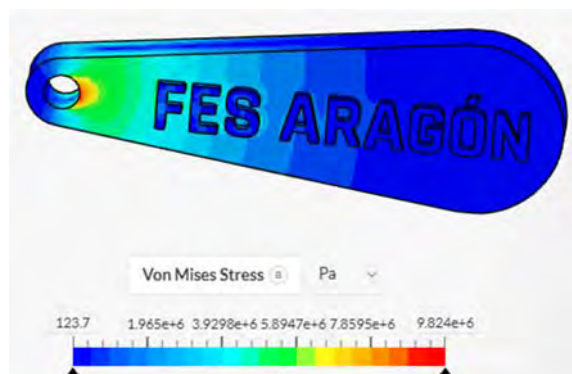


FIGURA 3. Simulación FEM estática.

La figura 3 muestra el resultado del esfuerzo Von Mises, considerando que también es posible obtener datos complementarios como los desplazamientos y los esfuerzos distribuidos en cada eje, entre otros parámetros relevantes para el análisis estructural.

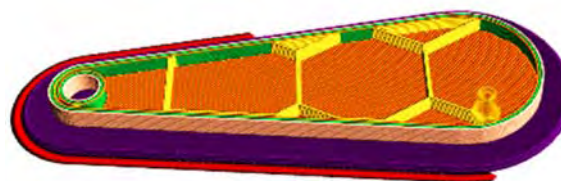


FIGURA 4. Simulación con software de impresión 3D.

Al realizar la simulación con el software específico de una impresora 3D, como se muestra en la figura 4, se obtienen datos directamente vinculados con variables clave del proceso, tales como la velocidad de impresión, la temperatura del filamento en cada etapa o zona, el espesor de capa y el número total de capas. Estas variables pueden ser ajustadas estratégicamente para optimizar las condiciones operativas del equipo y mejorar la calidad del producto final.

2.4. Resultados

Dentro de los resultados obtenidos, es posible generar representaciones gráficas, imágenes, algoritmos y otros elementos visuales o conceptuales que apoyan el análisis.

En la figura 5 se muestra un segmento del algoritmo utilizado para la simulación térmica, el cual resulta esencial para comprender tanto el comportamiento del sistema como su implementación. Este recurso facilita la visualización de las etapas clave en el proceso de modelado y análisis computacional.

```
# Definition of material: ABS
MAT_0 = DEF_MATERIAU(
  THER=F(
    LAMDA=0.17,
    RHO_CP=1320000.0,
  ),
)
# Define mesh file
MESH = LIRE_MALLAGE(
  FORMAT="MED",
  INFO=1,
  UNITE=20,
)
# Creation of node groups from every element group
MESH = DEF_GROUP(
  CREA_GROUP_NO=F(
    TOUT_GROUP_MA="OUI",
  ),
  INFO=1,
  MALLAGE=MESH,
  reuse=MESH,
)
# Model definition of phenomena and element types
MODEL = AFFE_MODELE(
  AFFE=(
    _F(
      MODELISATION="3D",
      PHENOMENE="THERMIQUE",
      TOUT="OUI",
    )
  )
)
```

FIGURA 5. Algoritmo de la simulación para el caso de análisis en temperatura.

Otro aspecto relevante corresponde al desplazamiento obtenido durante la simulación estática, ilustrado en la figura 6. Este resultado permite evaluar la respuesta mecánica del objeto ante cargas aplicadas, aportando información clave para el rediseño y la mejora del componente.

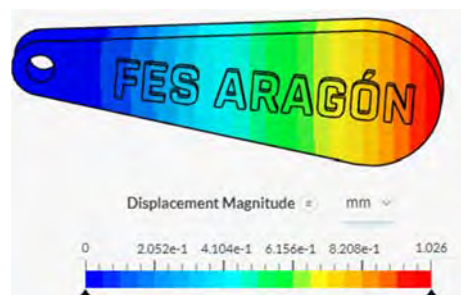


FIGURA 6. Simulación estática, desplazamiento.

Un recurso destacado del software de impresión es la generación automática de trayectorias en código G, como se muestra en la figura 7. Estas trayectorias permiten analizar con precisión cada movimiento ejecutado por la máquina, facilitando la evaluación y optimización del proceso de manufactura. A través de la revisión del código G, es posible ajustar parámetros clave como velocidad, desplazamientos y secuencia de capas con el fin de reducir tiempos de impresión y mejorar la precisión del producto final. Este análisis contribuye a un proceso de fabricación más eficiente y controlado. En conjunto, las trayectorias en código G constituyen una herramienta fundamental para perfeccionar la manufactura aditiva y asegurar resultados de alta calidad.

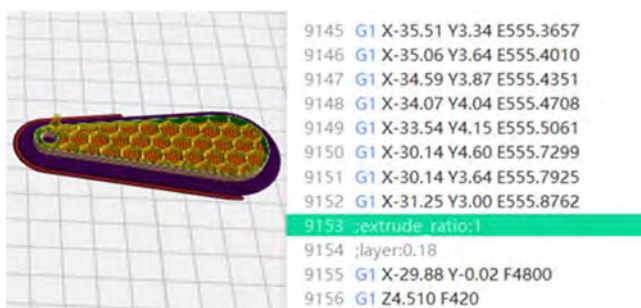


FIGURA 7. Simulación impresora 3D, código G.

Lo expuesto hasta este punto representa un conjunto de herramientas valiosas para su integración en el entorno académico, particularmente en la formación de comunidades educativas vinculadas con la ingeniería. La incorporación de estas tecnologías no solo enriquece los contenidos curriculares, sino que también fortalece el aprendizaje práctico, fomenta la innovación y mejora integralmente la comprensión de los principios fundamentales de esta disciplina científica.

2.5. Retroalimentación y mejora continua

Concluidas las etapas anteriores de la metodología, resulta esencial generar procesos de retroalimentación que permitan evaluar los avances obtenidos y promover la mejora continua. Estas observaciones son clave para identificar áreas de oportunidad y realizar ajustes necesarios que optimicen los resultados.

La retroalimentación debe integrarse de manera sistemática en las actividades docentes, especialmente en asignaturas que se beneficien de dichas innovaciones, con el objetivo de enriquecer el contenido y fortalecer el aprendizaje. Este ciclo de evaluación, ajuste y perfeccionamiento contribuye a una enseñanza dinámica, efectiva y alineada con los retos actuales de la educación en ingeniería.

Como parte de la retroalimentación derivada del caso de estudio, se destaca que la aplicación de la simulación computacional en el diseño del llavero permitió anticipar posibles fallos estructurales y optimizar su geometría antes del proceso de impresión 3D, lo cual representó un ahorro significativo de tiempo y recursos. Esta herramienta también facilitó una visualización clara del producto final, asegurando el cumplimiento de los criterios estéticos y funcionales establecidos. El proceso contribuyó a elevar la precisión y la calidad del diseño definitivo.

La tecnología de impresión 3D permitió la rápida fabricación del prototipo del llavero, lo que facilitó su validación en términos de ergonomía y resistencia bajo condiciones reales. La integración de simulación computacional y manufactura aditiva posibilitó ajustes inmediatos al diseño, minimizando errores y costos asociados. En conjunto, estas herramientas fortalecieron el proceso de innovación y eficiencia en el desarrollo del producto, obteniendo un resultado más preciso.

3. RESULTADOS

Como parte de los resultados, se presenta la fabricación de un llavero mediante tecnología de manufactura aditiva por impresión 3D, dentro de un caso de estudio específico. La pieza, mostrada en la figura 8, evidencia la viabilidad técnica y precisión alcanzada a través de este método para la creación de objetos personalizados. Este proceso resalta las ventajas inherentes a la impresión 3D, tales como la rapidez, la flexibilidad en el diseño y la adaptabilidad en la producción. Los resultados demuestran el potencial de esta tecnología para aplicaciones prácticas y de diseño, tanto en contextos académicos como industriales.



FIGURA 8. Llavero impreso en 3D.

Algunos parámetros y variables identificados como beneficios derivados del uso de herramientas de simulación computacional y manufactura aditiva se presentan en la Tabla 1. Estos elementos muestran mejoras significativas en aspectos clave como la precisión dimensional, la eficiencia operativa y la reducción de costos. La incorporación de estas tecnologías permite optimizar el diseño y la producción, favoreciendo una mayor competitividad y calidad en los resultados obtenidos.

TABLA 1. Variables y parámetros de mejora.

Método	Variable	Tiempo [h]	Observaciones
Con ven cion al	Idea	10	Bosquejos
	Diseño	30	Bosquejo y modelador de CAD
	Tiempo de fabricación	360	5 pzas utilizando inyección de plásticos
	Ajustes	10	Metrología y maquinado extra
	Validación	25	Control de Calidad.
Sim ulac ión com puta cion al + 3D	Idea	10	Bosquejos
	Diseño	45	Modelador de CAD, simulaciones
	Tiempo de fabricación	3	5 pzas impresion 3D
	Ajustes	1	Metrología
	Validación	15	Control de Calidad.

La implementación de estas tecnologías permite optimizar tanto el diseño y la producción, generando resultados más efectivos y sostenibles. La Tabla 1 sintetiza los principales beneficios identificados durante el análisis, destacando mejoras en precisión, tiempos de ejecución y aprovechamiento de recursos.



En la Tabla 2 se presenta de manera general el total de horas necesarias para la elaboración de llaveros, considerando las características previamente establecidas.

TABLA 2. Tiempos estimados con las dos metodologías.

Método	Variable	Tiempo [h]
Con ven cion al	Idea	10
	Diseño	30
	Tiempo de fabricación	360
	Ajustes	10
	Validación	25
	Total	435
Sim ulac ión com puta cion al + 3D	Idea	10
	Diseño	45
	Tiempo de fabricación	3
	Ajustes	1
	Validación	15
	Total	74

En la tabla 2 se observa que la integración de la simulación computacional con la impresión 3D permite una reducción significativa en el tiempo total de desarrollo en comparación con el método tradicional, pasando de 435 a 74 horas. Esto evidencia la eficiencia y rapidez que ofrece la tecnología moderna en procesos de diseño y fabricación. Los tiempos en etapas clave como fabricación y ajustes son considerablemente menores, lo que puede traducirse en mayor productividad y menor costo. Sin duda, la integración de estas tecnologías representa una ventaja competitiva en la ingeniería, educación y producción.

La incorporación de temáticas como la simulación computacional y la manufactura aditiva con impresión 3D en la formación de estudiantes de ingeniería es fundamental para potenciar sus habilidades técnicas y prepararlos para los desafíos actuales del sector. Estas áreas pueden abordarse desde etapas tempranas, como en cursos de introducción a la ingeniería, hasta en niveles avanzados de especialización y proyectos de investigación, permitiendo una comprensión integral y aplicada. Integrar estos temas en diferentes fases del currículo enriquece la experiencia académica, fomenta la innovación y mantiene a las instituciones educativas a la vanguardia de las tendencias tecnológicas a nivel nacional e internacional.

4. DISCUSIÓN

El artículo [8] trata sobre simulación computacional en soldadura plasma y fabricación aditiva, en donde resalta cómo la tecnología avanzada permite optimizar procesos y

mejorar la resistencia de materiales, alineándose con la innovación en la formación en ingeniería mediante simulaciones 3D que potencian habilidades prácticas y conocimientos teóricos en manufactura aditiva.

Los autores en [9] mencionan cómo la integración de experimentos y simulaciones mejora la precisión en la manufactura aditiva, mientras que la innovación en la formación para ingeniería con simulación computacional y manufactura con impresión fomenta habilidades avanzadas y adaptadas a estas tecnologías emergentes. Ambas fuentes subrayan la importancia de la simulación y el modelado como parte de la innovación y la eficiencia en los procesos de fabricación y formación técnica.

Existe la coincidencia con [10], debido a que los autores presentan un modelo eficiente para la fabricación aditiva por fusión láser en lecho de polvo, destacando su aplicación en simulaciones computacionales mediante algoritmos de elementos finitos (FEM). Los resultados demuestran una alta precisión en la predicción del comportamiento mecánico de las piezas, mejorando la optimización del proceso, similar a lo obtenido en este trabajo, con la optimización de un caso de estudio.

El estudio [11] expresa cómo la evolución de los límites térmicos durante la fabricación aditiva con alambre y arco en paredes simples de aleación 5A06 influye en la calidad y propiedades del material, destacando la importancia de comprender estos procesos para optimizar la enseñanza en ingeniería y promover el desarrollo de tecnologías avanzadas.

En el artículo [12] revelan los autores que la manufactura aditiva y la simulación computacional son herramientas fundamentales para avanzar en la ingeniería moderna, permitiendo una mayor comprensión de los procesos de fabricación metálica. La modelación y simulación con métodos de partículas facilitan la optimización y el control de estas tecnologías, impulsando la innovación y eficiencia en la industria. En la actualidad, estas herramientas son esenciales para la enseñanza y el desarrollo de soluciones ingenieriles más precisas y sostenibles, que es lo indicado en el trabajo desarrollado como parte de involucrar estas herramientas en la enseñanza.

En [13] se observa la importancia de la manufactura aditiva y la simulación computacional como herramientas fundamentales en la ingeniería actual y moderna. Estas tecnologías permiten una mejor comprensión de los procesos, optimizando la calidad y eficiencia de los componentes fabricados. Facilitan la enseñanza y el aprendizaje, promoviendo la innovación y el desarrollo de soluciones más sostenibles. La integración de la manufactura aditiva y la simulación impulsa avances significativos en la ingeniería contemporánea.





Al igual que en [14], la integración de modelos a diferentes escalas como una estrategia clave para optimizar la fabricación aditiva de aceros. Estos avances permiten una mejor comprensión dentro de los procesos durante la fabricación de los especímenes y propiedades del material, facilitando el diseño y control de componentes con mayor precisión. La manufactura aditiva se ha convertido en una herramienta fundamental en la ingeniería, promoviendo innovación y personalización en la producción. En el futuro, se espera que estas tecnologías impulsen aún más la eficiencia, sostenibilidad y desarrollo de nuevos materiales. La incorporación de modelos multiescala potenciará la enseñanza y la investigación, preparando a ingenieros para los desafíos de una industria cada vez más digitalizada y avanzada.

5. CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la integración de simulación computacional y manufactura aditiva en la formación en ingeniería representa una estrategia efectiva para el aprendizaje práctico y de innovación en los programas de estudio en las licenciaturas de ingeniería. La metodología propuesta se basa en un enfoque estructurado y en etapas claras, que permite no solo optimizar los procesos de diseño y fabricación, sino también reducir significativamente los tiempos y costos asociados (variables de interés). La implementación en casos de estudio, como el llavero personalizado, muestra cómo estas tecnologías facilitan la comprensión de conceptos complejos y fomentan la creatividad en los estudiantes. La evaluación de resultados confirma que estas herramientas mejoran el rendimiento académico y motivacional, promoviendo un aprendizaje activo y contextualizado.

El uso de simulaciones, como análisis de elementos finitos (FEM) y generación de trayectorias en código G, aporta una visión integral del proceso de fabricación, permitiendo detectar y corregir errores antes de la producción real. La retroalimentación obtenida en cada etapa favorece la mejora continua del proceso formativo, enriqueciendo los contenidos y ajustando las metodologías pedagógicas. La comparación entre métodos tradicionales y tecnológicos revela que la incorporación de estas herramientas reduce considerablemente el tiempo de desarrollo, incrementando la eficiencia y la precisión en la creación de prototipos. Esto evidencia que estas tecnologías ofrecen una transformación en la enseñanza y la práctica profesional dentro de la ingeniería.

Los resultados obtenidos, en la fabricación del llavero en 3D y las mejoras en variables clave, demuestran la viabilidad y ventajas de adoptar estas tecnologías en contextos

educativos y académicos. La reducción en los tiempos de diseño y fabricación, junto con la mejora en la calidad del producto final, resaltan la importancia de incorporar simulación y manufactura aditiva en los programas académicos que impactan en la enseñanza del alumnado. La comparación de horas invertidas en ambos métodos confirma que la innovación tecnológica no solo optimiza recursos, sino que también prepara a los futuros ingenieros para afrontar los desafíos de una industria cada vez más digitalizada y competitiva. Los resultados respaldan la necesidad de actualizar los currículos para incluir estas herramientas emergentes en los programas de las asignaturas.

Desde una perspectiva académica, la incorporación de simulación computacional y manufactura aditiva en la formación en ingeniería favorece la adquisición de habilidades técnicas avanzadas desarrollando competencias en innovación y sostenibilidad. La experiencia práctica con estas tecnologías permite a los estudiantes comprender mejor los procesos de diseño, análisis y fabricación, promoviendo un aprendizaje profundo y aplicado. Fomenta la investigación y el desarrollo de soluciones personalizadas, alineadas con las tendencias globales en manufactura inteligente. La integración curricular en diferentes niveles educativos asegura que los futuros ingenieros estén preparados para los retos actuales y futuros del sector industrial.

La implementación de metodologías que combinan simulación computacional y manufactura aditiva en la formación en ingeniería representa un avance significativo hacia una educación más eficiente, innovadora y alineada con las demandas tecnológicas. Los beneficios en términos de reducción de tiempos, costos y mejora en la calidad del aprendizaje son evidentes, posicionando estas herramientas como componentes esenciales en los programas académicos. Los resultados que se presentan invitan a las instituciones educativas a adoptar estas tecnologías para fortalecer sus procesos formativos y contribuir al desarrollo de ingenieros más competentes y preparados para la industria 4.0. La continua investigación y actualización en estas áreas serán clave para mantener la relevancia y excelencia en los procesos de enseñanza en ingeniería.

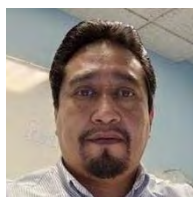
REFERENCIAS

- [1]. S. D. Proell, J. Brotz, M. Kronbichler, W. A. Wall, and C. Meier, "A highly efficient computational approach for fast scan-resolved microstructure predictions in metal additive manufacturing on the scale of real parts," Additive Manufacturing, vol. 92,





- p. 104380, Jul. 2024, Doi: 10.1016/j.addma.2024.104380.
- [2]. T. Auzinger, W. Heidrich, and B. Bickel, "Computational design of nanostructural color for additive manufacturing," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 37, no. 4, pp. 1–16, Jul. 2018, Doi: 10.1145/3197517.3201376.
- [3]. V. A. Erazo-Arteaga, "El diseño, la manufactura y análisis asistido por computadora (CAD/CAM/CAE) y otras técnicas de fabricación digital en el desarrollo de productos en América Latina," *Información tecnológica*, vol. 33, no. 2, pp. 297–308, Apr. 2022, doi: 10.4067/s0718-07642022000200297.
- [4]. M. A. Díaz-Martínez, R. V. Román-Salinas, S. Ruíz-Hernández, N. A. Hernández-Cortés, and V. I. González-Rubín, "La manufactura aditiva como elemento imprescindible de la industria 4.0 en beneficio de la ingeniería: un análisis bibliométrico," *Ingeniería Industrial*, no. 47, pp. 209–238, Dec. 2024, doi: 10.26439/ing.ind2024.n47.7153.
- [5]. N. Sánchez Zamora and I. A. Lira Hernández, "La manufactura aditiva como potenciador de los sistemas productivos," *INVENTUM*, vol. 15, no. 28, pp. 104–112, Sep. 2020, doi: 10.26620/uniminuto.inventum.15.28.2020.104-112.
- [6]. J. Lee and V. Prabhu, "Simulation modeling for optimal control of additive manufacturing processes," *Additive Manufacturing*, vol. 12, pp. 197–203, Oct. 2016, Doi: 10.1016/j.addma.2016.05.002.
- [7]. J. F. Marín-Brenes, G. Villalta-Pérez, M. N. Vargas-Hidalgo, M. Osés-Soto, and F. E. Badilla-Murillo, "Desarrollo de prototipos de órtesis protectoras pasivas mediante manufactura aditiva," *Revista Tecnología en Marcha*, Jun. 2024, doi: 10.18845/tm.v37i3.6839.
- [8]. S. Schönegger, M. Moschinger, and N. Enzinger, "Computational welding simulation of a plasma wire arc additive manufacturing process for high-strength steel," *European Journal of Materials*, vol. 4, no. 1, Jan. 2024, Doi: 10.1080/26889277.2023.2297051.
- [9]. M. A. Mahmood et al., "Additive Manufacturing: Experiments, Simulations, and Data-Driven Modelling," *Crystals*, vol. 14, no. 9, p. 763, Aug. 2024, Doi: 10.3390/cryst14090763.
- [10]. R. Tangestani, T. Sabiston, A. Chakraborty, L. Yuan, N. Krutz, and É. Martin, "An Efficient Track-Scale Model for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: Part 2—Mechanical Model," *Frontiers in Materials*, vol. 8, Nov. 2021, Doi: 10.3389/fmats.2021.759669.
- [11]. H. Geng, J. Luo, J. Li, J. Gao, and X. Lin, "Thermal Boundary Evolution of Molten Pool During Wire and Arc Additive Manufacturing of Single Walls of 5A06 Aluminum Alloy," *Metals*, vol. 10, no. 7, p. 848, Jun. 2020, Doi: 10.3390/met10070848.
- [12]. M. Afrasiabi and M. Bambach, "Modelling and simulation of metal additive manufacturing processes with particle methods: A review," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 18, no. 1, Nov. 2023, Doi: 10.1080/17452759.2023.2274494.
- [13]. L. Yuan, A. S. Sabau, W. Yan, and A. Kao, "Editorial: Advances in computational modeling of additive manufacturing processes," *Frontiers in Materials*, vol. 9, Aug. 2022, Doi: 10.3389/fmats.2022.980825.
- [14]. J. Sjöström, A. Durga, and G. Lindwall, "Linkage of Macro- and Microscale Modeling Tools for Additive Manufacturing of Steels," *Frontiers in Materials*, vol. 9, May 2022, Doi: 10.3389/fmats.2022.797226.



Jesús Vicente González-Sosa. Adscrito a la Facultad de Estudios Superiores Aragón UNAM, ubicada en Ciudad Nezahualcóyotl, México. Doctor en Ingeniería, título obtenido en 2013 en el Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Maestro en Ingeniería, obtenido en 2007 también en el Posgrado de la misma facultad.

Ingeniero Mecánico, título otorgado en 2003 por la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El área de investigación se centra en la enseñanza de las ciencias para la ingeniería y sus aplicaciones.

Experiencia laboral en la industria por 15 años para empresas privadas en puestos de dirección de área, supervisión, investigador, ingeniero de proyectos. Por otro lado, 21 años de experiencia docente en universidades públicas y privadas desarrollando actividades en la coordinación de proyectos integradores para estudiantes, tesis y tesinas en diferentes áreas de la ingeniería.

Ha publicado artículos en revistas indizadas, JCR, reconocimiento perfil PRODEP, pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel I. Participación en comités técnicos de revistas nacionales e internacionales.



Yadira Zavala-Osorio. Es Rectora de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (2023-2027) y Profesora-Investigadora del Departamento de Sistemas. Es mexicana, Investigadora Nacional Nivel I y cuenta con reconocimiento PRODEP.

Obtuvo su doctorado en Estudios Organizacionales en 2016, una maestría en Ingeniería en 2003 y una licenciatura en Ingeniería Industrial en 1999. Su investigación se centra en la seguridad e higiene en las organizaciones y en variables organizacionales, especialmente en instituciones de educación superior. Ha ocupado cargos como Secretaria de la Unidad Azcapotzalco y Secretaria Académica de la





División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Profesionalmente, trabajó en diagnóstico organizacional y fortalecimiento institucional en empresas y organismos como COFEPRIS, INEGI y la Secretaría de Salud.

Es autora de varios libros, incluyendo temas sobre PEMEX, distribución de insumos para la salud y seguridad industrial, además de publicaciones sobre sociedad del conocimiento, inteligencia artificial, tecnología, petróleo, competitividad, educación a distancia y seguridad industrial.



Enrique Ávila-Soler es profesor investigador del Instituto Tecnológico Gustavo A. Madero, en la Ciudad de México, México. Es Ingeniero Industrial, Maestro en Ciencias en Administración, Planificación y Economía de Hidrocarburos por el Instituto Politécnico Nacional, y Doctor en Ciencias Socioeconómicas, Estadística e Informática-

Economía por el Colegio de Postgraduados. Además, cuenta con una especialización en Gestión de Proyectos por UNITEC. Sus líneas de investigación se enfocan en simulación con apoyo en investigación de operaciones, logística y análisis industrial territorial. Ha trabajado en sectores como la industria automotriz, energética, financiera, construcción y medio ambiente, desempeñando funciones en planeación estratégica, evaluación de proyectos y análisis cuantitativo. En el ámbito académico, ha impartido clases y dirigido tesis en programas de ingeniería y administración. Es autor y coautor de diversas publicaciones científicas y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), Nivel I. Participa en redes académicas orientadas al desarrollo regional y la sustentabilidad.





Deciphering reaction pathways in triglyceride hydroprocessing: from stochastic exploration to deterministic optimization via a dual-phase Monte Carlo-Levenberg-Marquardt framework

CARLOS ALVARADO-CAMACHO^{1*}, CARLOS O. CASTILLO², ROBERTO QUINTANA SOLÓRZANO¹, LUIS F. RAMÍREZ-VERDUZCO¹

¹Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, Ciudad de México, 07730, México

²Laboratory of Catalytic Reactor Engineering Applied to Chemical and Biological Systems, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco 186, Col. Vicentina, C.P. 09340 Ciudad de México, México

Corresponding author: (e-mail: carlos.alvaradocamacho@outlook.com)

ABSTRACT The production of next-generation biofuels through hydrodeoxygenation (HDO) of triglycerides (TG) presents a promising strategy for producing diesel-range hydrocarbons that are compatible with current petroleum-based infrastructure. In this contribution, we propose and validate a kinetic model for the HDO of palm oil using a sulfided NiMo-based catalyst. The model incorporates a mechanistic framework rooted in Langmuir–Hinshelwood–Hougen–Watson and Eley–Rideal formalisms, capturing key transformation pathways such as TG hydrogenolysis, hydrodeoxygenation, decarboxylation (DC_x), and decarbonylation (DC).

A hybrid two-step parameter estimation approach was applied: first, Monte Carlo (MC) simulations sampled a wide range of plausible kinetic and thermodynamic parameters; then, the most relevant parameter clusters were refined through Levenberg–Marquardt (LM) optimization. This integrated stochastic–deterministic strategy led to the identification of a parameter set that is physically interpretable, thermodynamically consistent, and statistically robust.

The model successfully reproduces experimental outlet molar flows for species including H₂, triglycerides, C₁₄–C₂₀ paraffins, propane, water, carbon monoxide, and carbon dioxide. The results indicate that HDO predominates at lower temperatures and higher H₂/TG ratios, while decarboxylation routes become more relevant under H₂-lean and higher-temperature regimes. Importantly, the model captures how limitations in catalyst-bed utilization can bias the apparent contributions of individual pathways, emphasizing the need to interpret experimental data carefully in high-conversion regimes. Overall, the proposed framework provides valuable insights into the interplay of kinetic, catalytic, and reactor-

scale phenomena in TG hydroprocessing, enabling more rational design of conditions for targeted biofuel production.

INDEX TERMS Kinetics, hybrid parameters estimation; triglyceride; hydroprocessing; complex reaction network modeling; Monte Carlo–Levenberg–Marquardt optimization

1. INTRODUCTION

The increasing global demand for energy, coupled with the urgency of mitigating climate change [1,2], has intensified the need to transition away from fossil-based energy systems. The heavy reliance on petroleum derivatives not only contributes significantly to greenhouse gas emissions but also presents long-term sustainability concerns due to finite resource availability. As a result, the development of renewable and low-carbon energy alternatives is a global priority, particularly in sectors with high emission intensity such as transportation [3].

Among the proposed alternatives, biofuels—especially advanced liquid biofuels—have emerged as promising candidates [4]. Green diesel, in particular, offers compatibility with existing fuel distribution and combustion infrastructure. As a paraffinic hydrocarbon with high cetane number and negligible oxygen content, it meets ASTM D975 standards and can be used directly in current diesel engines [5–7]. Its production via catalytic hydrodeoxygenation (HDO) of vegetable oils has garnered significant attention due to its scalability and product quality. Forecasts from the International Energy Agency indicate that biofuel consumption will grow by nearly 30% between 2023 and 2028, largely driven by renewable diesel and sustainable





aviation fuel, which are expected to represent the majority of this expansion [8].

Palm oil has emerged as a widely available and economically viable feedstock for HDO-based green diesel production [9]. When processed over sulfided catalysts such as NiMo/Al₂O₃, it undergoes a complex series of reactions including hydrogenolysis, hydrocracking, decarboxylation (DC_x), and decarbonylation (DC), under typical hydrotreating conditions (200–400 °C, 30–150 atm) [10,11]. However, the selective transformation of triglycerides into high-quality diesel-range alkanes requires a thorough understanding of the reaction pathways and surface chemistry involved.

Although catalytic HDO offers significant potential for biofuel production, its industrial deployment remains hindered by several challenges [12,13]. The conversion of triglycerides involves a network of parallel and sequential reaction pathways—each with distinct hydrogen demands and thermodynamic behavior—which complicates the prediction of product yields and selectivity. These complexities affect catalyst utilization and the overall hydrogen balance of the process. Therefore, the development of kinetic models that accurately describe these transformations is a crucial step toward elucidating reaction mechanisms, guiding catalyst design, and enabling the optimization of reactor operation.

Several kinetic models have been developed for the HDO of fatty acid derivatives, but many rely on oversimplified assumptions or empirical approaches [14–19]. These often neglect key surface phenomena such as competitive adsorption and do not provide statistically rigorous or physically consistent parameter estimates. While mechanistic models based on Langmuir–Hinshelwood–Hougen–Watson (LHHW) or Eley–Rideal (ER) formalisms have been proposed, their predictive accuracy is often limited by insufficient experimental data and weak parameter estimation strategies.

This work presents a mechanistically kinetic model for the HDO of palm oil over a sulfided NiMo catalyst, capturing the intricate network of triglyceride conversion reactions. A hybrid parameter estimation methodology combining global Monte Carlo (MC) exploration and local Levenberg–Marquardt (LM) refinement is employed to ensure both robustness and physical relevance. The model integrates competitive adsorption effects and reproduces observed selectivity trends across a range of operating conditions.

Ultimately, this approach aims to provide actionable insights into the reaction mechanism, support catalyst performance evaluation, and guide process optimization for green diesel production from palm oil.

II. PROCEDURES

A. Catalytic experiments

Catalytic hydrodeoxygenation (HDO) of palm oil was performed in a high-pressure fixed-bed tubular reactor loaded with 8.32 g of sulfided NiMo/Al₂O₃ catalyst shaped as extrudates (0.841–1.41 mm). The catalyst bed was positioned between quartz wool plugs to ensure uniform flow distribution and thermal contact. Prior to each experimental campaign, the reactor was leak-tested at 1.2 times the working pressure and purged with nitrogen to ensure hermetic integrity and proper instrument functionality.

Catalyst activation followed a three-step procedure: 1. *Sulfhydration*: A straight-run gas oil (SRGO) and 3 wt% dimethyl disulfide (DMDs) were introduced at 30 cm³/h, together with H₂ at 7 slph. The temperature was raised at 10 °C/h until reaching 290 °C, where it was maintained for 15 h to promote sulfidation. 2. *Activation*: The hydrogen flow was increased to 13.4 slph, and the temperature was ramped at 3 °C/h to 321 °C and held for 8 h. 3. *Stabilization*: Pure liquefied petroleum gas (LPG) was fed at 10 cm³/h with H₂ at 4.5 slph, maintaining the reactor at 340 °C for 72 h to ensure catalytic stability prior to testing.

After this, HDO experiments were conducted at 53 atm by varying temperature (280–340 °C), LHSV (1.0 and 2.5 h⁻¹), and H₂/TG molar ratio (3–28). The W/F ratio ranged from 195 to 785 g_{cat} h mol_{TG}⁻¹. Following a stabilization period of 12 h, 53 steady-state data points were recorded. A data point was considered stable when five consecutive GC measurements showed less than 5% variation.

Gas-phase products (H₂, CO, CO₂, and C₃H₈) were analyzed using an Agilent 7890 GC equipped with TCD and FID detectors, configured with HP-Plot Alumina, HP-Plot Q, and HP-Plot MolSieve columns. Liquid products, comprising a hydrocarbon-rich organic phase and a water-rich aqueous phase, were separated by centrifugation (60 °C, 160 rpm, 20 min). The organic phase was analyzed via GC-MS (HP 6890/5973) using a DB-1HT column. A certified standard mix of n-C₁₀ to n-C₂₅ paraffins was employed for quantification. All carbon balances closed within 100 ± 5%, validating data reliability.





B. Reaction scheme

Based on experimental observations and previous literature reports, a reaction scheme was formulated to represent the main pathways involved in the hydrodeoxygenation (HDO) of palm oil over a NiMo-based catalyst (Figure 1). The mechanism starts with the cleavage of triglycerides (TGs) into free fatty acids (FFAs) via hydrogenolysis of ester bonds. These FFAs can differ in their saturation degree—polyunsaturated, monounsaturated, or saturated—depending on the fatty acid chain.

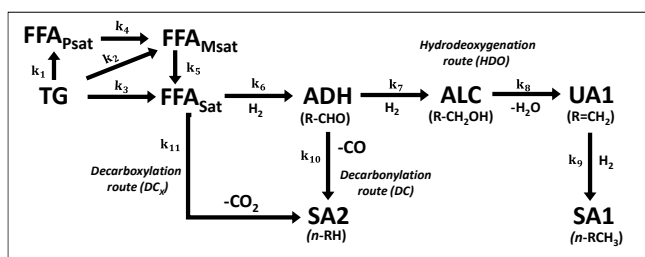


FIGURE 1. Global reaction pathways of the HDO of palm oil over a NiMo-based catalyst.

Subsequent steps involve hydrogenation of poly- and monounsaturated FFAs to their saturated counterparts, which then proceed through one of three competitive deoxygenation pathways:

1. **Hydrodeoxygenation (HDO):** Saturated FFAs undergo hydrogenation to aldehydes, followed by reduction to alcohols. Dehydration of alcohols forms olefins, which are then hydrogenated to even-carbon paraffins.
2. **Decarboxylation (DC_x):** FFAs eliminate CO₂ in a direct deoxygenation pathway, yielding odd-carbon number paraffins.
3. **Decarbonylation (DC):** Aldehydes generated from FFAs break down further by releasing CO, also forming odd-carbon number paraffins.

While HDO retains the full carbon chain and removes oxygen as H₂O, both DC_x and DC shorten the chain by one carbon atom, removing oxygen as CO₂ or CO. The nature of the resulting paraffins (even- or odd-carbon-numbered) is thus an indicator of the dominant pathway. Other side reactions such as hydrocracking and isomerization were not considered in this model, as no substantial amounts of light or branched hydrocarbons were detected under the tested operating conditions.

C. Reaction Mechanism

The proposed reaction mechanism for the catalytic hydrodeoxygenation (HDO) of palm oil over a sulfided NiMo-based catalyst was formulated under the assumption of a single representative active site (*). This mechanistic framework integrates elements from both Langmuir–Hinshelwood–Hougen–Watson (LHHW) and Eley–Rideal (ER) formalisms (see Table 1), and encompasses the main transformations leading to the formation of C₁₄–C₂₀ paraffins.

The mechanism initiates with the dissociative adsorption of molecular hydrogen onto adjacent active sites (Step A1), generating surface-bound hydrogen species (H*). The cleavage of triglycerides (TG) proceeds through three parallel hydrogenolysis steps, producing polyunsaturated, monounsaturated, and saturated free fatty acid species (FFA_{poli}*, FFA_{mono}*, FFA_{satu}*) along with propane as a byproduct (Steps 1–3).

TABLE I. Proposed reaction mechanism and rate equations for HDO of palm oil over a NiMo-based catalyst.

Reaction steps	Rate equation
A H _{2(g)} → H _{2(l)}	$\frac{dP_{H_2g}}{dW} = -k_{LA} \left(\frac{P_{H_2g}}{H_E} - C_{H_2l} \right)$
A1 H _{2(l)} + 2* ⇌ 2H*	$r_A = k_{A1} C_{H_2l} \theta_s^2 - k_{A1r} \theta_H^2$
1 TG + H* $\xrightarrow{+5H^*}$ 3 FTA _{poli} * + C ₃ H ₈ + 3*	$r_1 = k_1 C_{TG} \theta_H$
2 TG + H* $\xrightarrow{+5H^*}$ 3 FTA _{mono} * + C ₃ H ₈ + 3*	$r_2 = k_2 C_{TG} \theta_H$
3 TG + H* $\xrightarrow{+5H^*}$ 3 FTA _{satu} * + C ₃ H ₈ + 3*	$r_3 = k_3 C_{TG} \theta_H$
4 FTA _{poli} * + H* → FTA _{mono} * + *	$r_4 = k_4 \theta_{FTA_{poli}} \theta_H$
5 FTA _{mono} * + H* → FTA _{satu} * + *	$r_5 = k_5 \theta_{FTA_{mono}} \theta_H$
6 FTA _{satu} * + 2H* → ADH + H ₂ O* + 2*	$r_6 = k_6 \theta_{FTA_{satu}}^2 \theta_H$
7 ADH + 2H* → ALC + 2*	$r_7 = k_7 C_{ADH} \theta_H^2$
8 ALC + * → UA1 + H ₂ O*	$r_8 = k_8 C_{ALC} \theta_s$
9 UA1 + H* → SA1 + *	$r_9 = k_9 C_{UA1} \theta_H$
10 ADH → SA2 + CO	$r_{10} = k_{10} C_{ADH}$
11 FTA _{satu} * → SA2 + CO ₂ + *	$r_{11} = k_{11} \theta_{FTA_{satu}}$
B1 FTA _{satu} * ⇌ FTA _{satu} + *	$r_{B1} = k_{B1f} \theta_{FTA_{satu}} - k_{B1r} C_{FTA_{satu}} \theta_s$
B2 FTA _{mono} * ⇌ FTA _{mono} + *	$r_{B2} = k_{B2f} \theta_{FTA_{mono}} - k_{B2r} C_{FTA_{mono}} \theta_s$
B3 FTA _{poli} * ⇌ FTA _{poli} + *	$r_{B3} = k_{B3f} \theta_{FTA_{poli}} - k_{B3r} C_{FTA_{poli}} \theta_s$
C H ₂ O* ⇌ H ₂ O + *	$r_C = k_{D1} \theta_{H_2O} - k_{D2} P_{H_2O} \theta_s$

Saturated FFAs may follow three competing deoxygenation pathways:

- a) In the HDO route, FFAs react with surface hydrogen (H*) to form an aldehyde intermediate (ADH*) and surface water (H₂O*) (Step 6). The aldehyde is then hydrogenated to an alcohol (Step 7), which undergoes dehydration to yield an olefin (Step 8), and subsequent hydrogenation to form an even-carbon paraffin (SA1) (Step 9).
- b) In the DC pathway, the aldehyde intermediate decomposes via C–C bond cleavage, forming an odd-carbon paraffin (SA2) and carbon monoxide (CO) (Step 10).
- c) In the DC_x pathway, the saturated FFA directly decarboxylates, producing an odd-carbon paraffin (SA2) and carbon dioxide (CO₂) (Step 11).





Desorption steps regenerate the active surface site by releasing surface-bound FFAs (Steps B1–B3) and water (Step C) into the bulk phase.

D. Kinetic model

Starting from the mean-field approximation and the law of mass action, the rate of each reaction step j , as listed in Table 1, whether adsorption, desorption, or surface reaction takes place can be represented by eq. (1):

$$r_j = k_j^f \prod_i^{ne} [i]^{v_{ij}} - k_j^r \prod_l^{ne} [l]^{v_{lj}} \quad (1)$$

where:

k_j^f and k_j^r are, correspondingly, are the forward and backward rate coefficients of the step j ; $[i]$ and $[l]$ denote the concentration of species i or l (whether in the gas/liquid phase or adsorbed on the surface); v_{ij} and v_{lj} are the stoichiometric coefficients in the forward and reverse reactions, respectively. For purely surface reactions, the reverse kinetic coefficients for the gas/liquid phase are zero.

For each reaction species i , namely, H_2 , TG, FFA_{poli} , FFA_{mono} , FFA_{satu} , C_3H_8 , SA1, SA1, ADH, ALC, UA1, CO_2 , CO, and H_2O , the net production rate is given by the balance of its formation and consumption overall mechanistic steps, see eq. (2):

$$R_i = \sum_{j=1}^N v_{ij} r_{ij} \quad (2)$$

The surface coverage of adsorbed intermediates is computed by applying the pseudo-equilibrium approximation. After solving the adsorption–desorption equilibrium equations (Table 1) and enforcing active site conservation, the overall site balance is expressed in accordance with eq. (3):

$$\theta_s + \theta_{C_{FFA_{poli}}} + \theta_{C_{FFA_{mono}}} + \theta_{C_{FFA_{satu}}} + \theta_H + \theta_{H_2O} = 1 \quad (3)$$

For each adsorbed species $n \in \{FFA_{poli}, FFA_{mono}, FFA_{satu}, H_2O\}$, the fractional coverage is given by eq. (4):

$$\theta_n = K_n C_n \theta_s \quad (4)$$

For hydrogen dissociative adsorption (Step A1), the coverage is represented by eq. (5):

$$\theta_H = (K_A C_{H_2})^{1/2} \theta_s \quad (5)$$

Solving for the free active site fraction, we obtain the expression in eq. (6):

$$\theta_s = \frac{1}{1 + (K_A C_{H_2})^{1/2} + K_{B1} C_{FFA_{satu}} + K_{B2} C_{FFA_{mono}} + K_{B3} C_{FFA_{poli}} + K_C P_{H_2O}} \quad (6)$$

The kinetic rate coefficients ($\vec{k}_i$) and equilibrium adsorption constants (K_n) were calculated in the reparameterized forms via the Arrhenius and van't Hoff equations, respectively

Due to the number of parameters involved—including pre-exponential factors (A_0), activation energies (E_a), and adsorption enthalpies (ΔH_{ads}), a hybrid estimation strategy was adopted to ensure global consistency and local accuracy. A Monte Carlo (MC) approach was employed to explore wide parametric domains, generating 100,000 random parameter vectors uniformly distributed within physically plausible bounds. The model was then numerically integrated using each parameter set to simulate outlet molar flow rates of H_2 , TG, C_{14} – C_{20} paraffins, C_3H_8 , H_2O , CO, and CO_2 , under varying conditions of temperature (280–360 °C), pressure (53 atm), and H_2 /TG inlet molar ratio (3–28 mol/mol). Over 90,000 of these simulations successfully converged.

To reduce dimensionality and isolate high-performance parameter regions, Principal Component Analysis (PCA) and MiniBatch K-Means clustering ($k = 2$) were applied to the MC results. The centroids of the two best-performing clusters were selected as initial guesses for subsequent local refinement via the Levenberg–Marquardt (LM) algorithm. This dual-phase MC–LM procedure enabled the determination of statistically confident and physically meaningful kinetic parameters.

IV. RESULTS

A. Catalytic performance

The catalytic hydrodeoxygenation (HDO) of palm oil was assessed under a wide range of operating conditions. Experimental triglyceride (TG) and hydrogen (H_2) conversion, as well as normalized molar contributions of the HDO, decarboxylation (DCX), and decarbonylation (DC) pathways, were evaluated (Figures 2a–2d). TG conversion approached 100%, whereas H_2 conversion ranged from 18% to 100%, depending on the conditions. The relative contributions to C_{12} – C_{22} hydrocarbons varied significantly: HDO from 48% to 81%, DCX from 16% to 43%, and DC from 2% to 16%. These contributions were derived from the molar flow rates of pathway-specific products: even-carbon paraffins (HDO), CO_2 (DCX), and CO (DC).



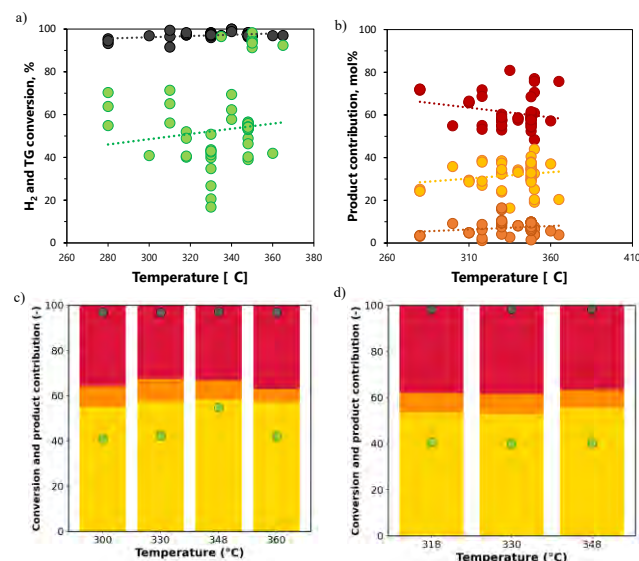


FIGURE 2. Conversion and reaction pathways normalized (selectivity) at the steady-state for the hydrodeoxygenation (HDO) of triglycerides (TG) over a Ni-Mo sulfided catalyst at varying conditions of temperature, H₂/TG inlet molar ratio and W/F.

Contrary to the trends reported for sulfided NiMo-based catalysts, where higher temperatures tend to favor decarboxylation [20], our results revealed that HDO selectivity increased with temperature. This deviation is likely due to the nearly complete TG conversion limiting the utilization of the full catalyst bed, potentially skewing apparent pathway contributions. Thus, constructing a kinetic model capable of disentangling intrinsic reactivity from such reactor-scale artifacts is essential.

B. Kinetic model validation

Our global stochastic search via Monte Carlo (MC) sampling effectively mapped the complex, multi-dimensional landscape of the kinetic model parameters. The convergence performance demonstrated a rapid identification of high-quality parameter sets, with the Sum of Squares (SSQ) sharply declining during the initial iterations before gradually flattening out. This plateau, achieved after approximately 50,000 samples, confirmed that our 100,000 sample points sufficiently covered the high-probability regions of the parameter space, reliably pinpointing global minima.

To distill the insights from our extensive Monte Carlo (MC) search, we analyzed the 200 parameter vectors yielding the lowest SSQ values. Applying Principal Component Analysis (PCA) and MiniBatch K-Means clustering, we identified two distinct parameter basins ($k=2$) within the multi-dimensional

space. The Silhouette Score analysis distinctly confirmed these two clusters as providing the clearest separation of high-quality parameter sets. From each cluster, the diverse centroids representing the lowest SSQ were then selected as highly promising initial guesses for the subsequent deterministic Levenberg-Marquardt (LM) refinement.

Having identified these robust initial parameters through the MC clustering exploration, the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm was then employed for gradient-based optimization to refine the kinetic parameters. We performed these LM regressions on the complete experimental dataset, utilizing the DASPK/ODR-Pack solver integrated with our plug-flow reactor model. This section evaluates both the simulated model performance and the physical interpretability of the fitted kinetic parameters.

The model's ability to accurately describe the experimental data is illustrated in Figure 3, which presents a parity plot comparing experimentally measured outlet molar flow rates with model-simulated values. This comparison covers all steady-state observations for key species: H₂, TG, even-saturated paraffins (SA1), odd-saturated paraffins (SA2), water (H₂O), propane (C₃H₈), CO₂, and CO. The vast majority of data points lie within $\pm 10\%$ of the parity line, indicating no systematic bias.

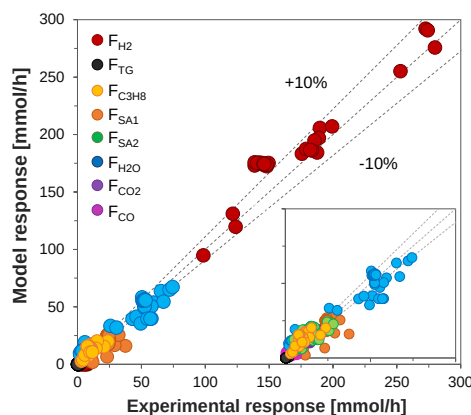


FIGURE 3. Parity plot showing the comparison of experimental and calculated molar flow rates of a set of species at the reactor outlet for the palm-oil HDO.

The statistical significance of individual parameters, at a 95% probability level, is thoroughly detailed in Tables 2 and 3 (available in the full paper). All estimated kinetic parameters exhibit t-values well above the critical value, indicating that their corresponding confidence intervals do not include zero. This confirms the statistical relevance of each parameter.





As can be observed in Tables II and III, the estimated kinetic parameters align well with the underlying surface chemistry. Activation energies for the hydrogenolysis and hydrogenation steps (1–5) range from 52 to 115 kJ·mol⁻¹, with re-parameterized pre-exponential factors (A_0) on the order of 10⁵–10⁹ cm³·s⁻¹·g_{cat}⁻¹ or mol·s⁻¹·g_{cat}⁻¹. These values are consistent with surface reaction-limited mechanisms, and the pre-exponential factors generally fall within 10³ to 10¹³ s⁻¹, agreeing with transition state theory estimates for surface reactions. Notably, Step 3, representing the direct hydrogenolysis of TG to the saturated FFA*, exhibits the lowest activation energy (52.6 kJ·mol⁻¹) among the C–O cleavage routes, suggesting its particular ease. Similarly, Step 5, the sequential hydrogenation of monounsaturated FFA* to saturated FFA*, has a comparably low barrier (66.3 kJ·mol⁻¹), indicating that its final saturation is kinetically straightforward. In both instances, the inherent weakness of the C–O bond in these species and the high surface coverage of H* facilitate rapid conversion to fully saturated FFAs. In contrast, Step 11, which denotes the lumped decarboxylation (DC_X) of a saturated fatty-acid intermediate (FFA_{sat}* → R + CO₂), displays a elevated activation energy (183.8 kJ·mol⁻¹) accompanied by an exceptionally high pre-exponential factor (1.8×10¹⁵ mol·s⁻¹·g_{cat}⁻¹). These "inflated" values, which considerably surpass typical molecular collision limits, likely highlight the complexity of modeling DC_X as a single elementary step. A more detailed decomposition of Step 11 into sequential sub-steps (e.g., intermediate formation followed by CO₂ surface migration) might yield parameters more amenable to chemical interpretation. For the dehydration and water-forming routes (Steps 6–8), activation energies are slightly higher (85 - 113 kJ·mol⁻¹), yet the pre-exponential factors remain within the 10⁹–10¹¹ cm³·s⁻¹·g_{cat}⁻¹ or mol·s⁻¹·g_{cat}⁻¹ range, which aligns with the kinetics of bond scission and recombination on metal surfaces. Finally, in Step 10, involving decarbonylation (DC), the estimated activation energy is approximately 119 kJ·mol⁻¹, with a pre-exponential factor equal to 1.9×10¹¹ cm³·s⁻¹·g_{cat}⁻¹; these values are reasonable for the cleavage of C–C and C–O bonds in an aldehyde species.

C. Reaction Pathways and Process Optimization

To define the optimal performance regimes for this catalytic process, we systematically mapped the combined effects of reaction temperature (280–380°C) and H₂/TG inlet molar ratio (5–25) on the contributions of the competing HDO, Decarboxylation (DC_X), and Decarbonylation (DC) pathways. The response surface contour plots in Figure 4

comprehensively display these pathway contributions at the reactor outlet, overlaid with triglyceride iso-conversion lines. Figure 4a highlights the HDO pathway's performance. It shows that optimal HDO contribution (exceeding 85% with >90% TG conversion) is achieved at high temperatures (350–360°C) and elevated H₂/TG molar ratios (15–20). This strong dependency underscores the critical role of both thermal energy to overcome activation barriers and sufficient hydrogen availability on the catalyst surface, which supports the favorable kinetics of hydrogenolysis and hydrogenation steps.

TABLE II. Estimated kinetic descriptors with corresponding 95% probability confidence intervals estimated using the MC-LM framework.

ID	A_0	Ea [kJ mol ⁻¹]	T-Value	Confidence Interval	
	[cm ³ ·s ⁻¹ ·g _{cat} ⁻¹] [mol·s ⁻¹ ·g _{cat} ⁻¹]			Lower	Upper
1	4.7×10 ⁹	115.4	22.86	96.5	120.8
2	2.1×10 ⁶	75.1	27.33	64.4	73.7
3	6.5×10 ⁵	52.6	18.39	54.9	58.6
4	4.4×10 ⁶	94.2	32.79	90.7	98.4
5	2.8×10 ⁵	66.3	21.82	60.6	73.7
6	1.8×10 ⁹	112.5	46.75	91.4	114.0
7	3.8×10 ⁹	84.7	39.49	68.0	96.2
8	4.7×10 ¹¹	103.9	27.86	78.	131.2
9	5.1×10 ¹²	110.5	22.63	76.0	138.7
10	1.9×10 ¹¹	119.0	28.11	102.4	131.6
11	1.8×10 ¹⁵	183.8	38.26	178.3	209.7
A	k ₁₂ [cm ³ ·s ⁻¹ ·g _{cat} ⁻¹]	309.83	42.32	295.3	324.3

TABLE III. Estimated catalyst descriptors with corresponding 95 % probability confidence intervals estimated using the MC-LM framework

	ΔH [kJ mol ⁻¹]	T-Value	Confidence Interval	ΔS [J mol ⁻¹ K]	T-Value	Confidence Interval
A1	63.66	63.66	102.9 - 109.5	57.5 ^a	---	---
B1	190.8	58.73	184.4 - 197.2	245.9	34.26	231.8 - 260.1
B2	172.3	28.86	160.6 - 184.1	260.6	28.35	242.5 - 278.7
B3	215.6	55.18	207.9 - 223.3	276.7	53.39	266.6 - 286.9
C	82.9	96.31	81.2 - 84.6	106.1 ^a	---	---

Conversely, Figure 4b illustrates that the highest DC_X contribution (above 20%) is concentrated in regions of elevated temperatures (above 340°C) but critically low H₂/TG molar ratios (<7). This inverse relationship with hydrogen availability indicates that high hydrogen partial pressure effectively suppresses the DC_X pathway, favoring hydrodeoxygenation. This competitive behavior stems from the higher activation energy of DC_X steps compared to HDO, making DC_X more sensitive to hydrogen surface coverage.



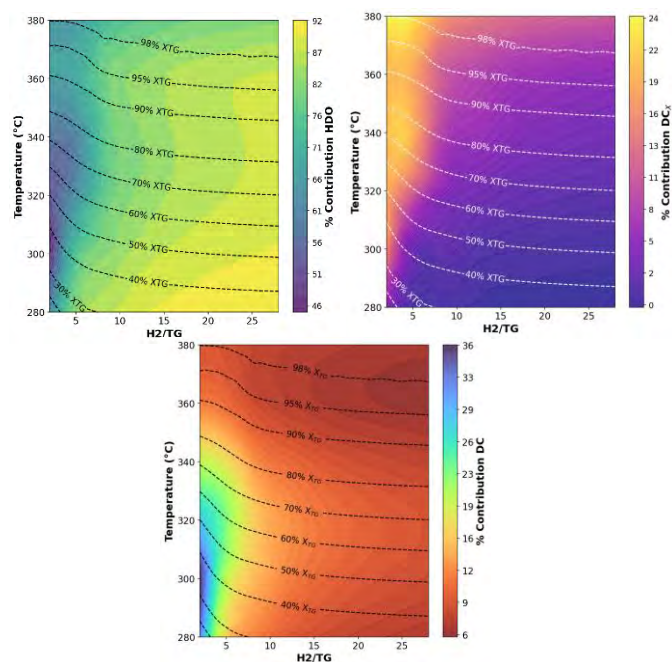


FIGURE 4. Response-surface contour plots showing the effect of reaction temperature (280–380 °C) and H_2/TG inlet molar ratio (3–26) on the relative contributions of (a) HDO, (b) DC_X , and (c) DC pathways at the reactor outlet.

Figure 4c depicts the Decarbonylation (DC) pathway's contribution. It shows a broader optimal region, generally favored by intermediate temperatures (around 310–330°C) and low H_2/TG molar ratios (<5), although less sharply suppressed by high H_2/TG than DC_X . This suggests distinct mechanistic sensitivities of DC compared to DC_X , even though both lead to odd-carbon number paraffins.

VII. CONCLUSION

In this work, we successfully developed a robust and phenomenologically grounded **kinetic model for triglyceride (TG) hydroprocessing** over a sulfided NiMo-based catalyst. We achieved this by integrating global Monte Carlo (MC) sampling with deterministic Levenberg-Marquardt (LM) refinement. Our approach efficiently navigated the high-dimensional parameter space by uniformly sampling 100,000 candidate vectors and then using PCA and MiniBatch K-Means clustering to pinpoint two optimal parameter basins. The subsequent LM optimization, based on experimental reactor outlet flow rates, yielded statistically and physically sound parameters, with activation energies ranging from 56.8 to 194.0 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ and adsorption enthalpies from -86.3 to -215.9 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, consistent with transition-state theory and Boudart's criteria.

The core of our contribution is an eleven-step LHHW-ER mechanism with a single active site, which accurately describes the sequential hydrodeoxygenation (HDO), decarboxylation (DC_X), and decarbonylation (DC) pathways of TG. Despite being exclusively trained on high TG conversion data (>98%), the model remarkably recovers intrinsic pathway trends at partial TG conversion conditions. For instance, HDO's relative contribution declines from 94% to 75% as temperature rises from 280 °C to 360 °C, while DC_X contributions increase correspondingly, aligning perfectly with mechanistic expectations based on relative activation barriers. Similarly, predictable shifts occur with varying H_2/TG inlet molar ratios: DC_X dominates under hydrogen-lean conditions ($H_2/TG \approx 3$ mol/mol), whereas HDO prevails when hydrogen is abundant ($H_2/TG > 25$ mol/mol). Crucially, the developed model offers a comprehensive map for tuning pathway selectivity in palm oil hydroprocessing. Engineers can strategically adjust temperature, hydrogen concentration, and catalyst loading to favor either even-carbon number paraffins via HDO or odd-carbon number products via DC_X , aligning with specific production goals. This versatility transforms the kinetic model into a practical tool for process optimization. Ultimately, the dual-phase Monte Carlo–Levenberg–Marquardt framework presented here is broadly applicable. It can be readily adapted to other biomass-derived feeds, catalyst formulations, and reactor configurations, thereby facilitating catalyst screening, accurate reactor scale-up, and the rational development of next-generation hydroprocessing technologies. By demonstrating that rigorous, physically meaningful parameter estimation is achievable even from apparent high-conversion datasets, this work sets a new standard for kinetic modeling in complex multi-pathway catalytic systems.

ACKNOWLEDGMENTS

The author gratefully acknowledges the SECIHTI program through the Estancias Posdoctorales por México (EPM) 2024 fellowship, which funded this postdoctoral stay at the Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) and made the research possible. Special thanks to the IMP for providing the institutional infrastructure and environment essential for conducting this investigation.

REFERENCES

- [1] IEA, World Energy Outlook 2023, Paris, 2023.
- [2] I. and I. to the S.A.R. of the I.P. on C.C. [Core W.T.H.L. and J.R. (eds.)] Contribution of Working Groups I, Climate Change 2023: Synthesis Report, Geneva, Switzerland, 2023.





- [3] A. Matura, R.K. Singh, R. Kumar, Decarbonizing road transport: A systematic literature review based on use case analysis, *Case Stud Transp Policy* 20 (2025) 101416. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101416>.
- [4] H. Wei, W. Liu, X. Chen, Q. Yang, J. Li, H. Chen, Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review, *Fuel* 254 (2019) 115599. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.007>.
- [5] U.S. Department of Energy, Renewable Diesel - Alternative Fuels Data Center, Alternative Fuels Data Center (2024).
- [6] American Society for Testing and Materials, ASTM D975-23, Standard Specification for Diesel Fuel Oils, West Conshohocken, PA, 2023.
- [7] J.H. Pratama, Z. Rahmawati, A.R. Widyanto, T. Gunawan, W.N. Wan Abdullah, N.L. Azua Jamari, A. Hamzah, H. Fansuri, Advancements in green diesel production for energy sustainability: a comprehensive bibliometric analysis, *RSC Adv.* 14 (2024) 36040–36062. <https://doi.org/10.1039/D4RA06262K>.
- [8] International Energy Agency, Renewables 2023 Analysis and forecasts to 2028, 2024. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (accessed May 27, 2025).
- [9] A. Suhara, Karyadi, S.G. Herawan, A. Tirta, M. Idris, M.F. Roslan, N.R. Putra, A.L. Hananto, I. Veza, Biodiesel Sustainability: Review of Progress and Challenges of Biodiesel as Sustainable Biofuel, *Clean Technologies* 6 (2024) 886–906. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6030045>.
- [10] S. Kim, E.E. Kwon, Y.T. Kim, S. Jung, H.J. Kim, G.W. Huber, J. Lee, Recent advances in hydrodeoxygenation of biomass-derived oxygenates over heterogeneous catalysts, *Green Chemistry* 21 (2019) 3715–3743. <https://doi.org/10.1039/C9GC01210A>.
- [11] M. Ruangudomsakul, N. Osakoo, J. Wittayakun, C. Keawkumay, T. Butburee, S. Youngjan, K. Faungnawakij, Y. Poo-arporn, P. Kidkhunthod, P. Khemthong, Hydrodeoxygenation of palm oil to green diesel products on mixed-phase nickel phosphides, *Molecular Catalysis* 523 (2022) 111422. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2021.111422>.
- [12] P. Mäki-Arvela, I. Kubickova, M. Snåre, K. Eränen, D.Yu. Murzin, Catalytic Deoxygenation of Fatty Acids and Their Derivatives, *Energy & Fuels* 21 (2007) 30–41. <https://doi.org/10.1021/ef060455v>.
- [13] E. Santillan-Jimenez, M. Crocker, Catalytic deoxygenation of fatty acids and their derivatives to hydrocarbon fuels via decarboxylation/decarbonylation, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 87 (2012) 1041–1050. <https://doi.org/10.1002/jctb.3775>.
- [14] A. Tirado, J. Ancheyta, Defining appropriate reaction scheme for hydrotreating of vegetable oil through proper calculation of kinetic parameters, *Fuel* 242 (2019) 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.100>.
- [15] G.C.R. Silva, M.H.C. de Andrade, Simulation of deoxygenation of vegetable oils for diesel-like fuel production in continuous reactor, *Biomass Convers Biorefin* 13 (2023) 1843–1857. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01441-w>.
- [16] R.G. Kukushkin, S.I. Reshetnikov, S.G. Zavarukhin, P.M. Eletskii, V.A. Yakovlev, Kinetics of the Hydrodeoxygenation of Ethyl Ester of Decanoic Acid over the Ni–Cu–Mo/Al₂O₃ Catalyst, *Catal Ind* 11 (2019) 191–197. <https://doi.org/10.1134/S207005041903005X>.
- [17] S.A. Selishcheva, M.Y. Lebedev, S.I. Reshetnikov, L.I. Trusov, V.A. Yakovlev, Kinetics of the hydrotreatment of rapeseed oil fatty acid triglycerides under mild conditions, *Catal Ind* 6 (2014) 60–66. <https://doi.org/10.1134/S2070050414010097>.
- [18] R.K. Sharma, M. Anand, B.S. Rana, R. Kumar, S.A. Farooqui, M.G. Sibi, A.K. Sinha, Jatropha-oil conversion to liquid hydrocarbon fuels using mesoporous titanasilicate supported sulfide catalysts, *Catal Today* 198 (2012) 314–320. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.05.036>.
- [19] M. Anand, A.K. Sinha, Temperature-dependent reaction pathways for the anomalous hydrocracking of triglycerides in the presence of sulfided Co–Mo-catalyst, in: *Bioresour Technol*, Elsevier Ltd, 2012; pp. 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.105>.
- [20] J.M. Anthonykutti, J. Linnekoski, A. Harlin, J. Lehtonen, Hydrotreating reactions of tall oils over commercial NiMo catalyst, *Energy Sci Eng* 3 (2015) 286–299. <https://doi.org/10.1002/ese3.70>.



Carlos Alvarado-Camacho was born in Mexico City, Mexico. He received his Bachelor of Science in petrochemical engineering from the National Polytechnic Institute - Higher School of Chemical Engineering and Extractive Industries, Mexico City, Mexico, in 2013. He then earned his Master of Science in chemical engineering from the Metropolitan Autonomous University - Campus Iztapalapa, Mexico City, Mexico, in 2016. He completed his Ph.D. in chemical engineering at Ghent University, Ghent, Belgium, in 2024. He is currently a Postdoctoral Researcher in chemical engineering at the Mexican Petroleum Institute (IMP). His research focuses on multi-scale modeling of co-processing vegetable oils and light gasoil in hydrotreating and FCC units for low-carbon biofuel production. Prior to this, he was a Postdoctoral Researcher in chemical engineering at Ghent University, Ghent, Belgium, from September 2021 to October 2024, where he worked on multi-scale modeling of propylene oligomerization and CO₂-assisted propane dehydrogenation. He also served as a BSc Teacher Assistant at Metropolitan Autonomous University - Campus Iztapalapa from September 2016 to August 2018. Dr. Alvarado-Camacho's expertise includes multi-scale research in catalytic reactor engineering, kinetic and industrial-reactor modeling, and chemical process simulation. He received a medal for university merit for obtaining the best grades in his Master of Science program and the XXXII Research Award 2023 for the best article published in the Area of Basic Sciences and Engineering, UAM.





Novel correlations for the determination of LiBr–H₂O concentration in thermodynamic absorption cycles

JOSÉ LUIS LABRA¹, JAVIER DELGADO-GONZAGA², WILFRIDO RIVERA², AUGUSTO ARIEL AGUILAR¹, MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO³, DAVID JUÁREZ-ROMERO³

¹Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Jiutepec, Morelos, 62550, México

²Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, 62588, México

³Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, 62209, México

Corresponding author: José Luis Labra (e-mail:jluislabra@upemor.edu.mx).

ABSTRACT The LiBr–H₂O working pair is the most widely used in absorption thermodynamic cycles, mainly due to its high efficiency. Accurate measurement of the LiBr–H₂O concentration is critical in such systems, as it directly impacts efficiency, safety, and stability. However, determining the concentration of LiBr–H₂O poses significant technical challenges due to variations in operating conditions, dependence on physical parameters, limitations of measurement techniques, and corrosion-related issues. Some approaches to overcome these difficulties include the implementation of automated and corrosion-resistant sensors, indirect measurement methods, non-invasive optical techniques, and integration with mathematical models and real-time control algorithms. This study proposes new correlations to accurately and reliably estimate the LiBr–H₂O concentration as a function of temperature and electrical conductivity. Concentration measurements were carried out using a commercial conductivity meter across temperature and LiBr–H₂O weight concentration ranges of 35–80 °C and 10–65 %, respectively. The correlations for electrical conductivity were derived using a least squares regression model. The fitting follows a first-degree polynomial in temperature and a second-degree polynomial in concentration, and is validated using experimental data available in the literature.

INDEX TERMS LiBr–H₂O Concentration, Absorption Thermodynamic System, Electrical Conductivity.

1. INTRODUCTION

In absorption thermodynamic systems, the working solution plays a fundamental role in the transfer of mass and energy between the main components of the cycle. This solution, typically composed of an absorbent and a refrigerant (e.g., lithium bromide and water), enables the system to operate using a heat source instead of mechanical electricity, as in compression systems. The physicochemical properties of the working solution directly influence cycle efficiency and critical phenomena such as crystallization. Therefore, monitoring and controlling the solution concentration are essential to ensure optimal performance and prevent operational failures in absorption-based refrigeration, air-conditioning, or desalination systems.

The thermophysical properties of the working solution are key parameters for determining its composition. Currently, various techniques have been developed and applied to estimate this composition based on the relationship between physical properties and temperature. Among the most commonly studied properties for this purpose are sound velocity, viscosity, vapor pressure, solubility, refractive index, density, and electrical conductivity. In this context, electrical conductivity stands out as a simple, practical, and reliable measurement technique, since the measuring device can be coupled either directly or indirectly, requires a very small sample volume, and offers good sensitivity and precision. The literature includes studies that report the implementation of electrical conductivity for determining the concentration of LiBr–H₂O solutions. Osta-Omar and Micallef [1] experimentally investigated the electrical conductivity of aqueous lithium bromide solutions with





concentrations ranging from 45 wt% to 65 wt% and temperatures between 25 °C and 95 °C, employing a high-precision submerged toroidal sensor. They proposed an empirical correlation valid for concentrations between 45 wt% and 60 wt% within the same temperature range, reporting a maximum deviation of 5.8%. Labra et al. [2] measured density, refractive index, sound velocity, and electrical conductivity for LiBr–H₂O solutions in the range of 45 wt% to 65 wt% and temperatures from 20 °C to 80 °C, aiming to develop concentration estimation methods for prototype absorption machines. Barba et al. [3] performed a factorial analysis measuring electrical conductivity, refractive index, and sound velocity in LiBr–H₂O solutions with mass fractions from 45 wt% to 65 wt% and temperatures between 50 °C and 70 °C. Their results indicated that conductometry offers a precision comparable to that of refractometry. Wu et al. [4] assessed electrical conductivity in aqueous solutions of LiBr, LiCl, and LiI over a broad range of concentrations and temperatures, providing relevant comparative insights into the behavior of LiBr relative to other salts.

The existing literature primarily addresses LiBr–H₂O concentrations in the range of 40 wt% to 60 wt% LiBr. However, no studies have been identified that examine concentrations below 40 wt%. In the present study, a mathematical correlation based on electrical conductivity is proposed to estimate the concentration of LiBr–H₂O solutions over an extended range, from 10 wt% to 65 wt% LiBr.

II. METHODOLOGY

The aqueous LiBr solution was prepared using anhydrous lithium bromide reagent, previously dried in a muffle furnace, and Milli-Q grade water as the solvent. The concentration was expressed as the weight percentage of LiBr. Electrical conductivity was determined with a conductivity cell connected to a conductivity meter, while temperature was monitored with a calibrated sensor. Homogenization of the solution was ensured by employing a magnetic stirrer and a heating plate.

The experimental procedure consisted of heating the solution in a glass flask until the target temperature was reached. Conductivity measurements were

performed at 10 °C intervals. Once thermal equilibrium was established, the electrical conductivity was recorded. Measurements were also conducted during the cooling process.

The electrical conductivity cell employed is of the toroidal type, ensuring that the physical properties of the solution do not influence the measurements and eliminating polarization effects arising from charge accumulation. Temperature control was achieved using a thermostatic bath. Solution concentration was determined as a function of electrical conductivity and temperature.

The concentration determination covered the operational range of absorption-based thermal processes for heating and cooling. The investigated concentration range extended from 10% to 65% by weight; above this limit, crystallization of the solution occurs. Temperature measurements were performed within the range of 35 °C to 80 °C. In absorption cycles, the solution concentration is determined in the absorber or generator components.

III. MATHEMATICAL EQUATIONS

Polynomial approximation

$$P_{1,1:3} = [+9.27959e - 06 - 3.020517e - 03 - 8.22155e - 02]$$

$$P_{2,1:3} = [-6.03874e - 04 + 2.31677e - 01 + 5.92681e + 00]$$

$$P_{3,1:3} = [+1.04423e - 02 - 6.18888e - 01 + 4.96645e + 00]$$

$$K_j = P_{j,1} \cdot T^2 + P_{j,2} \cdot T^1 + T_{j,3} \quad j = 1 \dots 3 \quad (1)$$

Then

$$K_e = K_1 \cdot X^2 + K_2 \cdot X^1 + K_3 \quad j = 1 \dots 3 \quad (2)$$





The evaluation of the composition from the electrical conductivity is obtained resolving the previous quadratic equation.

Observations:

- The solution equation present two roots. These correspond to High and low concentration.
- The validity of estimation of composition limited to $Ke < Ke_{Lim}$. Where $Ke_{Lim} = Ke(X_{Lim})$, and $X_{Lim} = -0.5 \frac{K_2}{K_1}$

Statistical analysis

Maximum error to estimate Electrical conductivity $Ke_{ErrMax} < 8.00$

Standard deviation $Ke_{Std} = 4.14$

Maximum error to estimate composition $Cm_{ErrMax} = 2.161$

Standard Deviation $Cm_{ErrStd} = 0.532$

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

FIGURE 1 shows the trend of electrical conductivity with respect to concentration for the temperature range from 35 C to 80 C. The behavior of the concentration is parabolic according to the variation of temperature, presenting increasing and decreasing variations, according to low and high concentrations respectively.

Electrical conductivity reaches a maximum value near 40% by weight of LiBr. This maximum value is largely due to the influence of ions present in the solution and the physical properties of the solvent, such as viscosity and dielectric constant. This generates a phenomenon that affects the transport of electrical charges in the solution.

It is important to understand the nature of electrical conductivity throughout the concentration range and how it varies with temperature. As analyzed, it exhibits a parabolic behavior; however, this does not prevent it from being considered an efficient and reliable alternative for determining concentration, since the range of interest is from high LiBr concentrations.

In the high concentration range, the behavior is linearly descending, so the adjustment to obtain the equation is more practical.

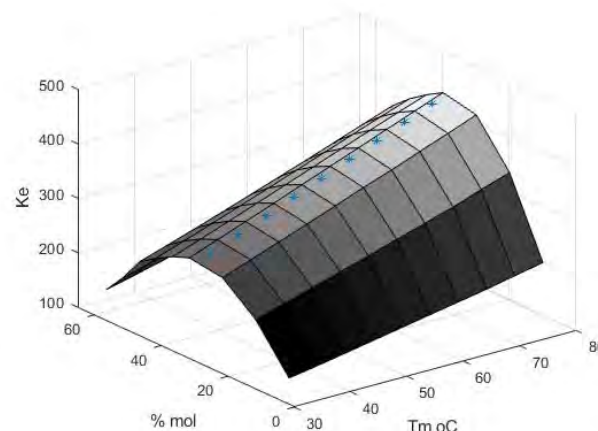


FIGURE 1 Behavior of electrical conductivity vs. concentration in % weight of LiBr.

FIGURE 2 shows the behavior of electrical conductivity with temperature variation for the concentration range of 10% to 65% by weight of LiBr. The behavior is linear, as electrical conductivity increases as temperature increases. It can be seen that the maximum electrical conductivity reaches is close to 40% by weight, as previously mentioned.

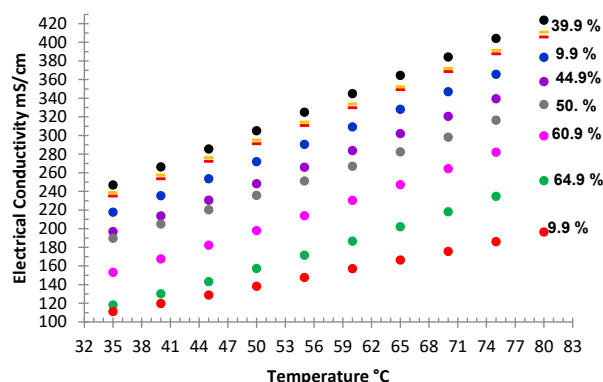


FIGURE 2 Behavior of electrical conductivity vs. temperature of the aqueous solution of LiBr.

Electrical conductivity variations increase at very low and high concentrations. In the concentration range of 20% to 40% by weight of LiBr, the conductivity variation is more uniform; in this concentration range, it is not influenced by the physical properties of the solute and solvent in the solution.

Linear behavior is favored by temperature variations. It can be observed that the mobility of LiBr ions increases with temperature, allowing the reliable passage of electric current. Therefore, this mobility favors or greatly contributes to high electrical conductivity values. Finally, Table 1 reports experimental data on electrical conductivity with respect to temperature increases. These





data demonstrate linear behavior with temperature and quadratic behavior with concentration.

Table 1 Experimental data of conductivity with respect to temperature.

T	X [%]								
°C	9.99	19.99	29.99	39.98	44.96	50.05	55.02	60.03	64.95
35	111.2	189.8	238.8	246.9	235.1	217.7	197.0	153.13	118.1
40	119.6	205.0	257.5	266.3	253.5	235.4	213.7	167.53	130.3
45	128.8	220.3	276.3	285.5	272.4	253.6	230.6	182.4	143.2
50	138.3	235.7	295.2	305.1	291.3	272.0	248.2	198.07	157.2
55	147.6	251.2	314.3	325.0	310.7	290.5	266.0	214.0	171.5
60	157.1	267.0	334.0	344.9	329.9	309.3	283.9	230.47	186.7
65	166.4	282.5	352.3	364.4	349.3	328.2	302.0	247.27	202.1
70	175.6	298.2	372.0	384.3	368.6	347.0	320.6	264.5	218.2
75	186.2	316.4	391.2	404.1	387.6	365.7	339.4	282.0	234.7
80	196.4	333.3	411.1	423.7	405.7	383.9	357.7	299.6	251.5

refrigeration systems. International Journal of Refrigeration, 59, 217–226.

Wu, X., Zhang, M., & Zhang, Y. (2019). Electrical Conductivity of LiBr, LiCl, and LiI Aqueous Solutions at Different Temperatures: Experimental Data and Modeling. Journal of Chemical & Engineering Data, 64(5), 2222–2231.

VII. CONCLUSION

Electrical conductivity is a physical property that allows estimating the composition of the LiBr content present in the working solutions used in thermal absorption processes. Its behavior is linear with temperature variations and quadratic with the weight concentration of LiBr. This is a safe and reliable measurement technique.

The equations allow the determination of the weight concentration of LiBr with an acceptable margin of error.

Investigating the electrical conductivity behavior of LiBr–H₂O solutions within the 10–65% concentration range provides fundamental data to optimize system monitoring across all operating phases, prevent operational failures, and expand the scientific understanding of the system's physical behavior.

REFERENCES

- [1]. Osta-Omar, M., & Micallef, D. (2017). Determination of concentration of the aqueous lithium–bromide solution in a vapour absorption refrigeration system by measurement of electrical conductivity and temperature. Data, 2(1), 6.
- [2]. Labra, A., & Cabeza, L. F. (2016). Application of the electrical conductivity of concentrated electrolyte solutions to industrial process control and design: From experimental measurement towards prediction through modeling. Applied Thermal Engineering, 100, 916–926.
- [3]. Barba, A., Lecuona, A., Legrand, M., & Rodríguez-Hidalgo, M. C. (2015). Experimental determination and correlation of physical properties of aqueous lithium bromide solutions for absorption





Análisis termohidráulico de reactores nucleares de sal fundida

J. JORGE DOMÍNGUEZ A.^a, ALEJANDRÍA D. PÉREZ-VALSECA^a Y GILBERTO ESPINOSA-PAREDES^a

^a Avenida Ferrocarril San Rafael Atlixco #186, Col. Leyes de Reforma 1A Sección, Alcaldía Iztapalapa, Código Postal 09310, Ciudad de México

Autor de Correspondencia: J. Jorge Dominguez A. (e-mail: jorge.dominguez.alfaro@gmail.com)

RESUMEN Desde su concepción en los años 50, los reactores de sal fundida (MSR, por sus siglas en inglés) han sido considerados una promesa revolucionaria en el diseño de sistemas nucleares. Como parte de la cuarta generación de reactores, los MSR ofrecen una alternativa segura, eficiente y sostenible frente a los reactores nucleares convencionales. A diferencia de estos últimos, que utilizan combustible sólido y agua como moderador, los MSR emplean una mezcla líquida de sales fundidas como combustible y refrigerante para la generación de potencia y la transferencia de calor, lo que permite operar a presiones cercanas a la atmosférica y con mayor estabilidad térmica. Entre sus ventajas destacan una mayor eficiencia térmica, una mejor gestión del ciclo del combustible y una respuesta intrínseca de seguridad ante aumentos de temperatura. En estos reactores se utiliza helio, un gas inerte con baja absorción neutrónica, cuyo propósito es arrastrar productos de fisión gaseosos —considerados venenos neutrónicos— que se generan durante la operación del reactor. La presencia de burbujas de helio en la sal fundida, puede introducir efectos significativos tanto en la dinámica térmica como en la cinética neutrónica del sistema. En este trabajo se investiga el comportamiento multifísico de un MSR aplicando modelos escalados para la fase líquida (sal combustible) y la fase gaseosa (helio). Estos modelos permiten describir el campo de temperatura dentro del núcleo del reactor, considerando la interacción entre ambas fases. Los resultados muestran que, a medida que la temperatura del reactor aumenta, se produce una expansión térmica en la fase gaseosa, lo cual incrementa la fracción de vacío y la distribución de las burbujas de helio. Estos efectos contribuyen al comportamiento dinámico del reactor.

PALABRAS CLAVE: Reactor nuclear de sales fundidas, modelos escalados, análisis multifísico, flujo multifásico.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las tecnologías de Generación IV se encuentra coordinado por el Foro Internacional de Generación IV (GIF), fundado en 2001 [8]. Estas tecnologías han sido seleccionadas con base en ocho objetivos agrupados en cuatro áreas: sostenibilidad, economía, seguridad y fiabilidad, y resistencia a la proliferación y protección física. Los nuevos diseños buscan un uso más eficiente del combustible, la reducción de desechos y la aplicación de tecnologías económicamente competitivas que cumplan con los estándares de seguridad y resistencia a la proliferación [11].

Se han definido seis tecnologías: el reactor rápido refrigerado por gas (GFR), el reactor rápido refrigerado por plomo (LFR), el reactor de sal fundida (MSR), el reactor supercrítico refrigerado por agua (SCWR), el reactor rápido refrigerado por sodio (SFR) y el reactor de muy alta temperatura (VHTR) [11].

Los MSR son una de las propuestas más ambiciosas de la Generación IV, ya que emplean una mezcla de sal de haluro que contiene material fisible, generalmente una combinación de uranio y torio. En este sistema, la sal actúa simultáneamente como combustible y refrigerante, circulando de forma continua a través del núcleo y pasando por un intercambiador donde transfiere la energía térmica a un circuito de sal secundaria. Esta última fluye hacia un segundo intercambiador para transferir el calor a un fluido de trabajo, que suele ser agua.



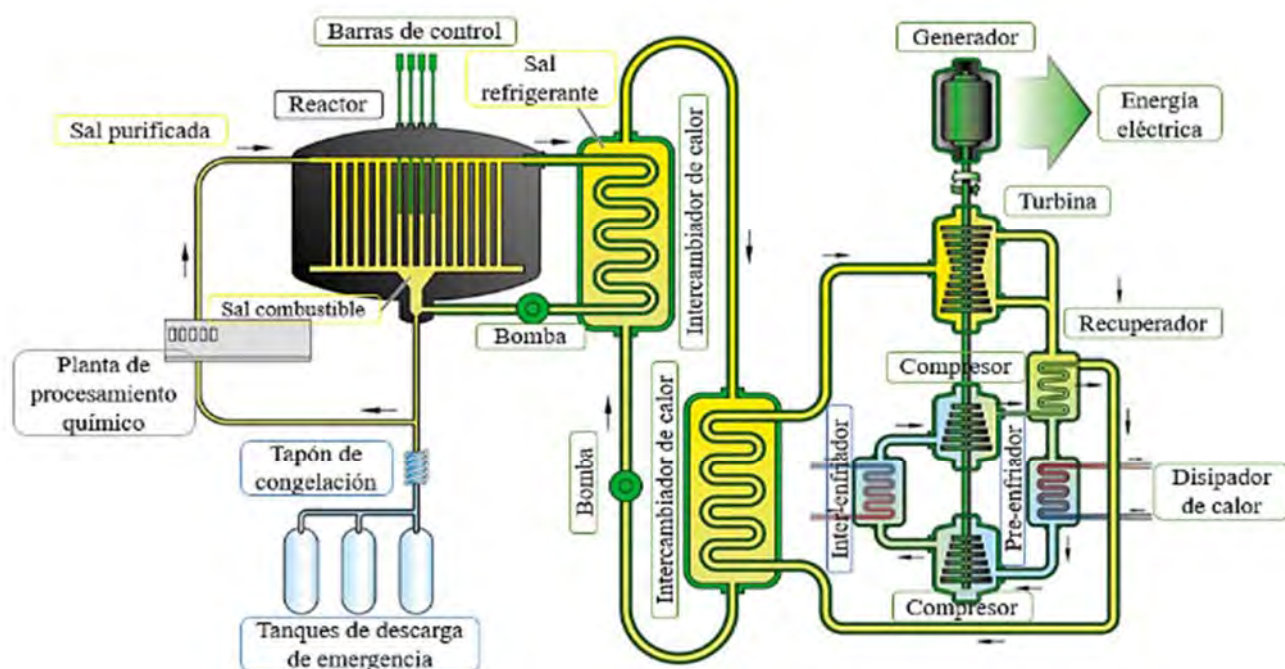


FIGURA 1. Diagrama esquemático de un MSR térmico [9]

El agua se convierte en vapor e ingresa a la turbina, donde genera el trabajo requerido para accionar un generador y producir electricidad (Figura 1) [1].

2. Reactor de sal fundida (MSFR).

El reactor rápido de sales fundidas (MSFR) es un reactor de espectro rápido de 3000 MWth y 1300 MWe, con un ciclo de combustible torio-uranio. Contiene un volumen total de 18 m³ de sal combustible, con una altura de 2.25 m y un radio de 2.25 m. Opera a una temperatura de entrada de 923.15 K y alcanza una temperatura máxima de 1023.15 K [2].

Emplea una mezcla de sales $\text{LiF-}^{232}\text{ThF}_4\text{-}^{233}\text{UF}_4$. La sal combustible fluye desde el fondo hacia la parte superior del núcleo, para luego alimentar los 16 módulos externos (bomba e intercambiador de calor) dispuestos alrededor de este, como se ilustra en la Figura 2 [2].

El MSFR cuenta también con un sistema de drenaje, empleado en caso de apagado del reactor ante un aumento significativo de temperatura en el núcleo que exceda los parámetros de operación [12].

La mezcla inicial de sal combustible contiene 77.5 % mol de fluoruro de litio (LiF) y 22.5 % mol de núcleos pesados fisiles y fértiles, correspondientes a 2.5 % mol de uranio-233 y 20 % mol de torio-232.

Existen 16 sistemas de inyección de burbujas, uno por cada bomba e intercambiador de calor. El burbujeo de gas helio (He) cumple dos funciones: eliminar partículas metálicas por flotación y extraer los productos de fisión gaseosos (FP), como los gases nobles Kr, Xe y H, así como partículas metálicas en suspensión [10], antes de su descomposición en la sal.

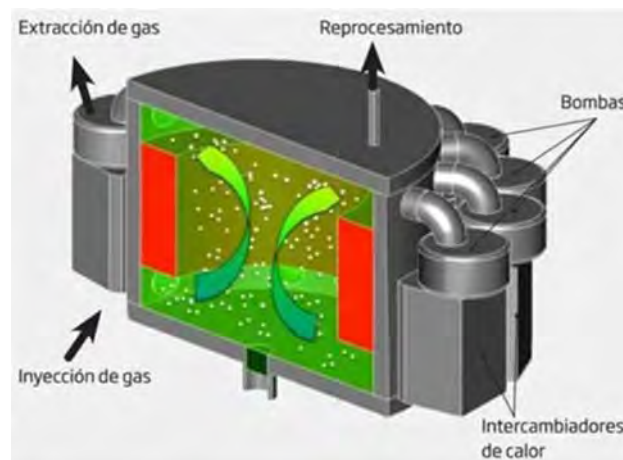


FIGURA 2. Núcleo del MSFR



2.1. Propiedades fisicoquímicas de la sal

El núcleo de un reactor rápido de sales fundidas tiene forma cilíndrica y contiene la sal combustible, cuyas propiedades se presentan en la **Tabla 1**.

TABLA 1. Propiedades fisicoquímicas de LiF-ThF4-233UF4 [11]

Propiedad	Formula
Densidad ρ (kg/m ³)	$4094 - 0.882(T[K] - 1008)$
Viscosidad cinemática ν (m ² /s)	$5.54 \times 10^{-8} e^{3689/T[K]}$
Viscosidad dinámica μ (Pas)	$\rho(g/cm^3) 5.54 \times 10^{-5} e^{3689/T[K]}$
Conductividad térmica K (W/m K)	$0.928 + 8.397 \times 10^{-5} T[K]$
Capacidad calorífica C_p (J/kg K)	$-1.1111 + 0.00278 \times 10^3 T[K]$

3. Modelo escalado de transferencia de calor

El núcleo de un reactor rápido de sales fundidas es un sistema bifásico que incluye el combustible (fase líquida) y burbujas de helio (fase gaseosa). El modelo escalado de transferencia de calor en un reactor nuclear permite describir su comportamiento térmico mediante ecuaciones simplificadas. Esto posibilita estudiar la distribución de energía térmica en el reactor empleando modelos computacionales más manejables. Las ecuaciones (1) y (2) representan los modelos escalados para la fase líquida y la fase gaseosa [7].

Sal fundida (fase líquida)

$$\begin{aligned} \varepsilon_l (\rho C_p)_l \frac{\partial \langle T_l \rangle^l}{\partial t} - (\rho C_p)_l \langle T_l \rangle^l \frac{\partial \varepsilon_l}{\partial t} + k_l (\nabla \varepsilon_l) \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l \\ + (\rho C_p)_l \nabla \cdot (\varepsilon_l \langle \mathbf{v}_l \rangle^l \langle T_l \rangle^l) = \nabla \cdot [\mathbf{K}_{ll} \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l + \mathbf{K}_{lb} \cdot \nabla \langle T_b \rangle^b] \\ + \mathbf{u}_{ll} \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l + \mathbf{u}_{lb} \cdot \nabla \langle T_b \rangle^b - a_v h (\langle T_l \rangle^l - \langle T_b \rangle^b) + \varepsilon_l \langle q_l'' \rangle^l \end{aligned} \quad (1)$$

Helio (fase gas)

$$\begin{aligned} (\rho C_p)_b \varepsilon_b \frac{\partial \langle T_b \rangle^b}{\partial t} - (\rho C_p)_b \langle T_b \rangle^b \frac{\partial \varepsilon_b}{\partial t} + k_b (\nabla \varepsilon_b) \cdot \nabla \langle T_b \rangle^b \\ + (\rho C_p)_b \varepsilon_b \nabla \cdot (\langle \mathbf{v}_b \rangle^b \langle T_b \rangle^b) = \nabla \cdot [\mathbf{K}_{bb} \cdot \nabla \langle T_b \rangle^b + \mathbf{K}_{bl} \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l] \\ + \mathbf{u}_{bb} \cdot \nabla \langle T_b \rangle^b + \mathbf{u}_{bl} \cdot \nabla \langle T_l \rangle^l - a_v h (\langle T_b \rangle^b - \langle T_l \rangle^l) \end{aligned} \quad (2)$$

Con las condiciones de frontera a la entrada al núcleo del reactor en la posición $z = 0$ m es de $\langle T_{l,g} \rangle^{l,g} = 928.15 K$.

Los coeficientes escalados de transferencia de calor $\mathbf{K}_{kk}$, $\mathbf{u}_{kk}$ y $a_v h$ son obtenidos de la referencia [7].

4. Modelo hidrodinámico

Las siguientes ecuaciones describen la conservación de masa en el sistema, incluyendo la conservación de la fracción volumétrica de cada fase, y la dinámica del momento, considerando las fuerzas externas e internas que afectan el movimiento de las fases (Ecs. 3–16) [5].

Helio (fase gas)

$$\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} + \varepsilon_g \nabla \cdot \langle \mathbf{v}_g \rangle^g + \langle \mathbf{v}_g \rangle^g \cdot \nabla \varepsilon_g = 0 \quad (3)$$

Sal fundida (fase líquida)

$$\varepsilon_l = 1 - \varepsilon_g \quad (4)$$

Helio (fase gas)

$$\begin{aligned} \rho_g \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \langle \mathbf{v}_g \rangle^g) + \rho_g \nabla \cdot [\varepsilon_g \langle \mathbf{v}_g \rangle^g \langle \mathbf{v}_g \rangle^g] \\ + \varepsilon_g \nabla \langle p_g \rangle^g + \langle \Delta p_i \rangle \nabla \varepsilon_g - \nabla \cdot [\varepsilon_g \mathbf{T}_g^{\text{Re}}] \\ - \varepsilon_g \rho_g \mathbf{g} = \mathbf{M}_i \end{aligned} \quad (5)$$

Sal fundida (fase líquida)

$$\langle \mathbf{v}_l \rangle^l = \frac{\mathbf{J}_0 - \langle \mathbf{v}_g \rangle^g \varepsilon_g}{\varepsilon_l} \quad (6)$$

En donde

El Momento interfacial esta dado por

$$\mathbf{M}_i = \varepsilon_k (\mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{VM}) \quad (7)$$

La Fuerza de arrastre se define como

$$\mathbf{F}_D = \frac{3}{8} \rho_l \frac{C_D}{R_b} \mathbf{v}_r |\mathbf{v}_r| \quad (8)$$

Para calculando la velocidad relativa es a partir de

$$\mathbf{v}_r = \langle \mathbf{v}_g \rangle^g - \langle \mathbf{v}_l \rangle^l \quad (9)$$

Además, el coeficiente de arrastre interfacial esta dado por

$$C_D = \frac{4}{3} R_b \left[\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\sigma \varepsilon_l} \right] \quad (10)$$





Considerando la fuerza de masa virtual como

$$\mathbf{F}_{VM} = \frac{1}{2} \rho_l \mathbf{a}_{VM} \quad (11)$$

El vector de aceleración de masa agregada

$$\mathbf{a}_{VM} = \left(\frac{\partial \langle \mathbf{v}_g \rangle^g}{\partial t} + \langle \mathbf{v}_g \rangle^g \cdot \nabla \langle \mathbf{v}_g \rangle^g \right) - \left(\frac{\partial \langle \mathbf{v}_l \rangle^l}{\partial t} + \langle \mathbf{v}_l \rangle^l \cdot \nabla \langle \mathbf{v}_l \rangle^l \right) \quad (12)$$

El tensor de esfuerzos de Reynolds esta dado por

$$\mathbf{T}_k^{\text{Re}} = k \rho_k \varepsilon_k \mathbf{v}_r | \mathbf{v}_r | \quad (13)$$

Con un gradiente de presión interfacial

$$\langle \Delta p_i \rangle = -\xi \rho_k v_r^2 \quad (14)$$

Siendo la velocidad superficial para las fases

$$\mathbf{j}_k = \langle \mathbf{v}_k \rangle^k \varepsilon_k, \quad k = g, l \quad (15)$$

Con un flux total

$$\mathbf{J} = \mathbf{j}_g + \mathbf{j}_l \quad (16)$$

La fracción vacío, la fracción de líquido, y las velocidades del gas y del líquido se usan para calcular los coeficientes escalados y las temperaturas mediante las ecuaciones (1) y (2) de ambas fases, considerando a la entrada del núcleo del reactor una velocidad de la fase liquida de $v_{l0} = 0.6829 \text{ m/s}$ y de la fase gas de $v_{g0} = 0.9 \text{ m/s}$.

5. Modelo de cinética neutrónica

Flujo neutrónico

En los reactores de sal fundida, el flujo neutrónico depende de la interacción entre los neutrones y el combustible líquido en movimiento, lo que introduce características dinámicas únicas en comparación con los sistemas de combustible sólido. Factores como la velocidad del combustible, las variaciones en la densidad de la sal y la presencia de burbujas de helio pueden alterar localmente la población neutrónica, afectando la tasa de fisión y la transferencia de calor. Para este trabajo, el flujo neutrónico se calcula a partir de la Ec. 17 [3].

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi_c(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D_c \nabla^2 \phi_c(\mathbf{r}, t) - \Sigma_{ac} \phi_c(\mathbf{r}, t) + \frac{1}{v} \left(\frac{\rho(\mathbf{r}, t) + \rho_{ext}(\mathbf{r}) - \beta}{\Lambda} + \frac{1}{\ell_n} \right) \phi_c(\mathbf{r}, t) + \sum_{i=1}^G \lambda_i C_i(\mathbf{r}, t) \quad (17)$$

Concentración de precursores

Los precursores de neutrones retardados (C_i) (Ec. 18) son isótopos inestables producidos durante la fisión nuclear que emiten neutrones con un ligero retraso, desempeñando un papel importante en el control del reactor. En los reactores de sal fundida se introduce una dinámica única, ya que los precursores pueden migrar junto con la sal fundida a diferentes regiones del sistema, como en el lazo externo, compuesto por la bomba y el intercambiador de calor [6].

$$\frac{\partial C_i(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C_i + \lambda_i C_i(\mathbf{r}, t) = \beta_i \Sigma_f \phi_c(\mathbf{r}, t) \quad (18)$$

Reactividad

La reactividad del reactor (ρ) describe la desviación del sistema respecto a su estado crítico y está influenciada por diversos factores físicos. Incluye el término de reactividad térmica asociado al combustible líquido, el término que considera las variaciones en la fracción de gas y el término por barras de control (Ecs. 19–20) [6], con una reactividad inicial de $\rho_0 = 2.4149 \times 10^{-3}$.

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \rho_0 + \rho_{ext} + \alpha_f \left(\langle T_l \rangle^l(\mathbf{r}, t) - \langle T_{l0} \rangle^l(\mathbf{r}, t) \right) + \alpha_v \left(\varepsilon_b(\mathbf{r}, t) - \varepsilon_{b0}(\mathbf{r}, t) \right) \quad (19)$$

$$\rho_{ext} = -3.363 \times 10^{-9} Z^5 + 3.568 \times 10^{-5} Z^4 - 1.158 \times 10^{-3} Z^3 + 8.792 \times 10^2 Z^2 - 4.065 Z - 13.12 \quad (20)$$

Para este trabajo se consideraron los términos de reactividad por fracción de vacío, combustible líquido y barras de control, tomando en cuenta que con $Z=0.0$ m la barra de control está extraída, y con $Z=4.0$ m está completamente insertada en el núcleo del reactor [4].



6. RESULTADOS

Los modelos se analizaron en estado estacionario utilizando el software COMSOL Multiphysics. Como se mencionó anteriormente, el reactor nuclear de sal fundida de espectro rápido (MSFR) está compuesto por 16 intercambiadores de calor y bombas. Para este estudio se consideró una décima sexta parte del núcleo, equivalente a un intercambiador de calor y una bomba (**Figura 3**).

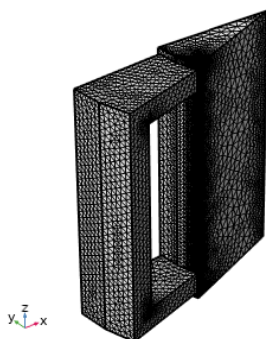


FIGURA 3. Malla normal en la decimosexta parte del núcleo.

En la **Figura 4** se observa el cambio en la velocidad del combustible líquido al emplear flujo laminar, con una velocidad constante en el núcleo en estado estacionario y una mayor en el lazo externo.

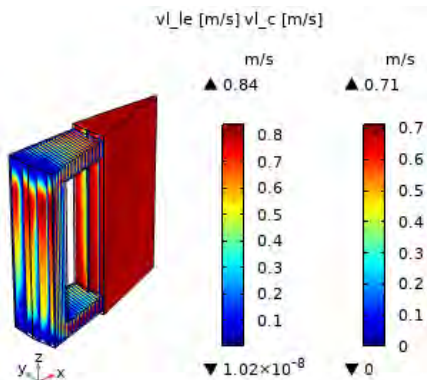


FIGURA 4. Flujo laminar en el núcleo del reactor.

Esta diferencia de velocidad entre el lazo externo y el núcleo se debe a que la sal combustible debe permanecer más tiempo en el núcleo para permitir que ocurran las fisiones. Es importante destacar que un mayor tiempo de residencia del combustible en el núcleo incrementa la potencia generada por el reactor.

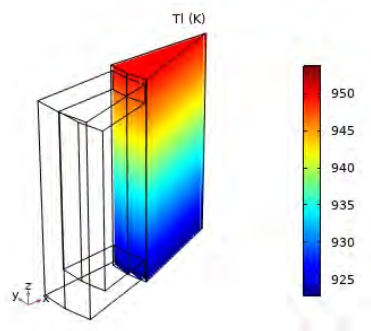


FIGURA 5. Temperatura de la fase líquida.

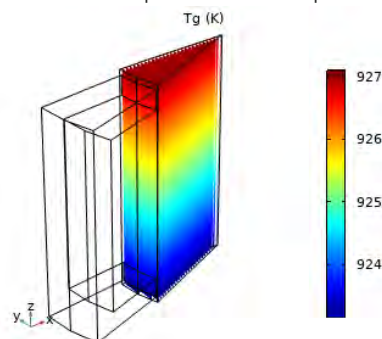


FIGURA 6. Temperatura de la fase gas.

Las temperaturas de ambas fases están relacionadas, ya que las burbujas de helio están inmersas en la sal combustible y muestran un máximo en la parte superior del núcleo del reactor, como se observa en las **Figuras 5 y 6**.

Una parte importante de la investigación es el cambio en la fracción de vacío, la cual aumenta a lo largo del núcleo debido a los fragmentos de fisión y a la expansión térmica, alcanzando su máximo en la parte superior (**Figura 7**). El valor inicial a la entrada del núcleo es de $\epsilon_{g0} = 0.1$.

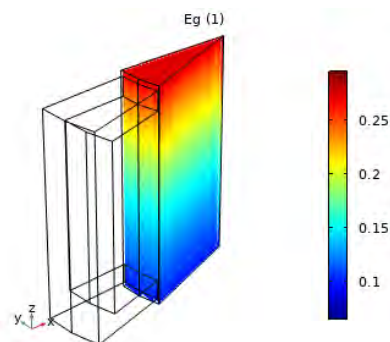


FIGURA 7. Fracción vacío en el núcleo.

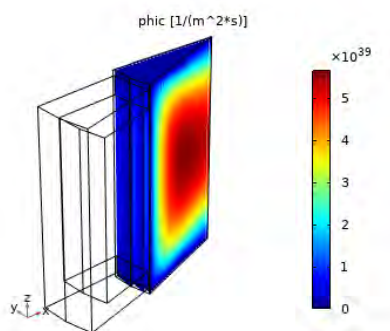


FIGURA 8. Flujo neutrónico en el núcleo.

Como se comentó anteriormente, la sal combustible líquida está en movimiento por todo el reactor, pero las fisiones solo ocurren cuando el buckling geométrico es igual al buckling del material. Esto sucede en el centro del núcleo del reactor, como se muestra en la **Figura 8**, donde se presenta el máximo del flujo neutrónico. Por lo tanto, en el lazo externo no ocurren fisiones, aunque sí pueden existir neutrones retardados debido a los precursores que se desplazan con la sal.

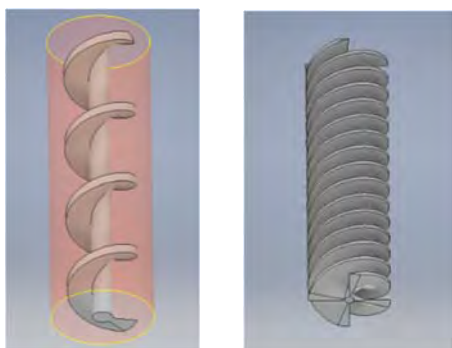


FIGURA 9. Barras de control

Para el reactor nuclear de sal fundida, las barras de control son helicoidales y pueden ser de 1 a 4, como se ilustra en la **Figura 9**. Esta forma helicoidal permite una mayor superficie de absorción de neutrones, facilitando una inserción gradual y uniforme, con lo que se reducen las perturbaciones en el flujo del combustible líquido [4].

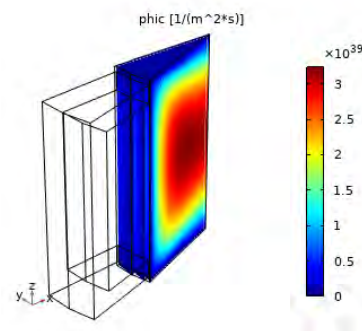


FIGURA 10. Flujo neutrónico, 3.5 m de barras

En la **Figura 10** se muestra que las barras de control fueron insertadas 3.5 m dentro del núcleo del reactor, cuya altura total es de 4.0 m. Esta inserción provocó una disminución del flujo neutrónico en el núcleo. A medida que aumenta la profundidad de inserción, el flujo disminuye; por el contrario, al retirar las barras, dicho flujo aumenta.

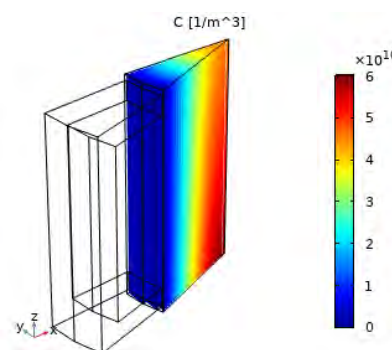


FIGURA 11. Concentración de precursores

En la **Figura 11** se observa el comportamiento de los precursores de neutrones, con un máximo en la parte central inferior del núcleo del reactor. Esto se debe a que viajan con el movimiento de la sal y retornan al núcleo después de pasar por el lazo externo (bomba e intercambiador de calor).



7. NOMENCLATURA

$a_v h$	Coefficiente de transferencia de calor volumétrico, [W/(m ³ K)]	u_{kk}	Coefficiente conductivo-convectivo escalado, [W/m ² K]
a_{vm}	Vector de aceleración de masa agregada, [m/s ²]	$\langle v_k \rangle^k$	Velocidad intrínseca, [m/s]
C	Concentración de precursores de neutrones, [cm ⁻³]	v	Velocidad de los neutrones, [m/s]
C_D	Coefficiente de fricción interfacial, [kg/m ³ s]	Z	Inserción de barras de control, [m]
Cp_k	Calor específico, [J/(kg K)]		Símbolos griegos
D_c	Coefficiente de difusión de neutrones, [cm ⁻¹]	α	Coefficiente de reactividad, [K ⁻¹]
g	Aceleración de la gravedad, [m/s ²]	β	Fracción de neutrones retardados
j_k	Velocidad superficial de la fase, [m/s]	ϵ_k	Fracción de volumen
k_k	Conductividad térmica, [W/(mK)]	λ	Constante de decaimiento de precursores, [s ⁻¹]
K_{kk}	Coefficiente térmico escalado, [W/(mK)]	Λ	Tiempo de generación de neutrones, [s]
ℓ_n	Tiempo instantáneo de generación de neutrones, [s]	ξ	Coefficiente de pérdida de presión interfacial
M_i	Cantidad de movimiento en la interfaz, [kg/m ² s]	ρ_k	Densidad de masa, [kg/m ³]
P	Presión, [MPa]	ρ	Reactividad,
$\langle q_l^m \rangle^l$	Densidad de potencia, [W/m ³]	σ	Tensión superficial, [N/m]
r	Vector de posición, [m]	Σ	Sección eficaz macroscópica, [1/cm]
R_b	Radio de burbuja, [m]	ϕ	Flujo neutrónico, [n/cm ² s]
T_{Re}	Tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds, [kg/ms ²]		Subíndice
$\langle T_k \rangle^k$	Temperatura intrínseca, [K]	k	Fase gaseosa (b , burbuja de helio) o Fase líquida (l , sal combustible)
t	Tiempo, [s]		

8. CONCLUSIONES

El modelo escalado de dos fases (líquida y gaseosa) para la transferencia de calor, junto con el enfoque hidrodinámico que permite calcular la fracción de vacío y las velocidades de cada fase, proporciona una descripción adecuada del comportamiento de la sal combustible dentro del núcleo del reactor. Como se muestra en las Figuras 5 y 6, la interacción entre las fases provoca un aumento de temperatura respecto a la temperatura de entrada al reactor. Estos resultados confirman que el modelo escalado es útil para representar los cambios térmicos en el sistema.

Además, la presencia de burbujas de helio (fracción de vacío) impacta significativamente tanto en la cinética neutrónica como en la transferencia de calor, lo que resalta la importancia de un modelado multifísico para analizar la operación dinámica y la seguridad del reactor. También es fundamental considerar el movimiento de los precursores de neutrones retardados y su efecto en el control del sistema.

Estos modelos son aplicables a reactores nucleares de sal fundida de espectro térmico, como el IMSR400 de la empresa Terrestrial, con las adecuaciones necesarias para incluir el efecto del moderador de grafito. La versatilidad y precisión de estos modelos escalados ofrecen un potencial significativo para apoyar el diseño, la optimización y la respuesta segura ante transitorios térmicos y neutrónicos en MSR.

AGRADECIMIENTOS

Los Autores agradecen el apoyo financiero del Proyecto de Ciencias Básicas y de Frontera 2023-2024 Referencia CBF-2023-2024-2023 financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI.





REFERENCIAS

- [1]. Abram, T., & Ion, S. (2008). Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. *Energy Policy* 36(12), 4323-4330.
- [2]. Allibert, M., Aufiero, M., Brovchenko, M., Delpech, S., Ghetta, V., Heuer, D., Laureau, A., & Merle-Lucotte, E. (2016). Molten salt fast reactor. En Pioro, I. (Woodhead Publisher), *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors* (pp.157-188). Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publisher.
- [3]. Caprais, M., & Bergeron, A. (2024). An iterative scheme to include turbulent diffusion in advective-dominated transport of delayed neutron precursors. arXiv preprint arXiv:2411.03788.
- [4]. Carter, J. P. (2022). *Multi-physics investigation of a natural circulation molten salt micro-reactor that utilizes an experimental in-pile device to improve core physics and system thermal-hydraulic performance*. University of Idaho.
- [5]. Espinosa-Paredes, G., & Soria, A. (1998). Method of finite difference solutions to the transient bubbly air-water flows. *International journal for numerical methods in fluids*, 26(10), 1155-1180.
- [6]. Harto, A. W., Kusnanto, A., Agung, A., Saputro, R. E., & Putra, M. Y. A. (2025). *Neutronic characteristics of the GAMA-MSR multipurpose steam supply system*. *Nuclear Engineering and Design*.
- [7]. Herrera-Hernández, E. C., Pérez-Valseca, A. D., Aguilar-Madera, C. G., & Vázquez-Rodríguez, A. (2023). Heat transfer coefficients for bubbly molten salt nuclear reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 414, 112549.
- [8]. Locatelli, G., Mancini, M., & Todeschini, N. (2013). Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects. *Energy Policy*, 61, 1503-1520.
- [9]. Luzzi, L., Di Marcello, V., & Cammi, A. (2012). *Multi-Physics Approach to the modeling and analysis of Molten Salt Reactors* (pp. 1-140). Nova Science Publishers, Inc.
- [10]. Merle-Lucotte, E. (2013). Introduction to the Physics of the Molten Salt Fast Reactor. In *Thorium Energy Conference* (Vol. 2013, p. 82).
- [11]. Pioro, I. (2016). Introduction: Generation IV International Forum. En Pioro, I. (Woodhead Publisher), *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors* (pp.157-188). Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publisher.
- [12]. Rouch, H., Geoffroy, O., Rubiolo, P., Laureau, A., Brovchenko, M., Heuer, D., & Merle-Lucotte, E. (2014). Preliminary thermal-hydraulic core design of the Molten Salt Fast Reactor (MSFR). *Annals of Nuclear Energy*, 64, 449-456.





Caracterización fisicoquímica y determinación del potencial bioquímico de metano de dos especies de sargazo del Caribe Mexicano

O. A. CRUZ RODRIGUEZ ^{A*}, D. GONZÁLEZ-TENORIO ^{A, B}, A. DURÁN-MORENO ^{A, A}, G.C. LÓPEZ-OJEDA ^A, F. ROJAS-TORREBLANCA ^A

Facultad de Química, CU, Universidad Autónoma de México (UNAM), Edificio de Alimentos y Química Ambiental, llamado "Conjunto E". Laboratorio 301 Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, +52 55 5622 5293, alfdur@unam.mx.

^b Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM, Av. de los Barrios 1, Hab Los Reyes Iztacala Barrio de los Árboles/Barrio de los Héroes, 54090 Tlalnepantla, Méx. 5556239750

Autor de Correspondencia: Alfonso Durán Moreno (e-mail: alfdur@unam.mx)

Se agradece al proyecto DGAPA UNAM, PAPIIT IT104025.

RESUMEN La proliferación del sargazo en costas mexicanas, ha generado problemas ecológicos, económicos y sociales, y si bien se han tomados medidas por parte del gobierno federal y por parte de la sociedad, es de importancia proponer medidas de mitigación y aprovechamiento de este recurso. Por lo anterior, este trabajo tiene el objetivo de determinar las características fisicoquímicas de dos especies de sargazo presentes en playas mexicanas, así como su viabilidad como biomasa para producir metano a través del Potencial Bioquímico de Metano (PBM). Inicialmente, se muestreo *Sargassum Fluitans* (*S. Fluitans*) en Telchac Yucatán, México y *Sargassum Natans* (*S. Natans*) en la playa Coral de Cancún, Quintana Roo, México. Las muestras se procesaron para el análisis fisicoquímico de los parámetros por triplicado de los Sólidos totales (ST), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y pH, según los métodos estándar. También se determinó los azúcares totales (AT) empleando el método de Dubois. El PBM se determinó a través de la DA de ambas biomásas empleando reactores tipo lote con una duración de 20 días. Los resultados muestran que respecto al PBM para *S. Fluitans* es de 85.49 NmL/g COD_{in} y para *S. Natans* de 138.25 NmL/gCOD_{in}, sin embargo, estadísticamente, no hay diferencia significativa

PALABRAS CLAVE: Sargazo, Caracterización fisicoquímica, PBM, biometano.

1. INTRODUCCIÓN

El sargazo (*Sargassum* sp.) es un grupo de alga perteneciente a la clase *Phaeophyceae* del orden *Fucales* y de la familia *Sargassaceae* [1]. Este tipo de alga tiene una gran importancia dentro de los ecosistemas marinos, provee de alimento, refugio y nutrientes a las especies marinas, en los que se encuentran organismos migratorios y peces comerciales en el océano Atlántico [2]. Las condiciones ideales para el crecimiento y reproducción del sargazo varían dependiendo de la especie, para *S. Fluitans* y *S. Natans* la temperatura óptima de crecimiento es de 28 – 30 °C, salinidad típica oceánica de 36 mg kg⁻¹ y una irradiación de 451 – 694 $\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$ [3]. La localización de esta alga en la zona fótica del océano Atlántico cumple con las características ambientales adecuadas para su propagación, principalmente en el mar de sargazo [3,4], el cual se encuentra ubicado en el giro subtropical del Atlántico Norte cubriendo el 65% de la superficie del océano concentrando biomasa, plásticos y contaminantes [4].



El crecimiento de sargazo por diversas causas tanto por factores biológicos, variaciones en la temperatura [5] y actividades antropogénicas, como el cambio de la temperatura y las descargas de aguas residuales a los ríos tropicales [5,6], proveen de nutrientes como nitratos y fosfatos [6, 7]. Como bien se observa, el incremento de la biomasa representa una oportunidad para su disposición y aprovechamiento de este recurso. Uno de ellos se centra en el aprovechamiento de materia orgánica por medio de la digestión anaerobia (DA), este proceso se basa en la fermentación microbiana en ausencia de oxígeno cuyo objetivo es la producción de metano y dióxido de carbono [8]. La DA consta de cuatro etapas hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [9]. La primera etapa se basa en la digestión de polímeros complejos como carbohidratos, proteínas y grasas mediante enzimas provenientes de bacterias hidrolíticas [10], los cuáles son transformados en monómeros como azúcares, ácidos grasos de cadena larga y aminoácidos [9,10]. La segunda etapa permite a los monómeros producidos en la etapa de hidrólisis ser absorbidos por bacterias facultativas y ser degradados a ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno [11]. La etapa de acetogénesis las bacterias acetogénicas consumen a los AGV, los cuales reducen el hidrógeno y dióxido de carbono en acetato [9,12]. La última etapa se centra en la producción de metano en un entorno anaeróbico a partir de bacterias acetofílicas, las cuales convierten el acetato e hidrógeno en metano y dióxido de carbono, de igual manera bacterias hidrogenofílicas convierten en dióxido de carbono e hidrógeno en metano [12].

2. METODOS Y MATERIALES

La metodología se dividió en tres etapas, las cuales consisten en el muestreo y tratamiento, aplicación de técnicas para determinar los parámetros fisicoquímicos y finalmente diseñar digestores anaerobios para las especies *S. Natans* y *S. Fluitans*.

2.1. Muestreo y tratamiento de muestra

Inicialmente, se muestreo en mayo de 2024 *Sargassum Fluitans* (*S. Fluitans*) en Telchac Yucatán, México y *Sargassum Natans* (*S. Natans*) en la playa Coral de Cancún, Quintana Roo, México (Figura 1). Las muestras se lavaron, se secaron al sol y fueron trasladadas al laboratorio, para un pretratamiento mecánico empleando un molino FitzMill. y un tamizado para la reducción a un tamaño de 500

micras. Paralelamente, se muestrearon lodos anaerobios (LA), provenientes de la planta de tratamiento de agua residual de la cervecería Modelo, para implementarlos como inóculos en los biorreactores para determinar el PBM de las especies de sargazo.

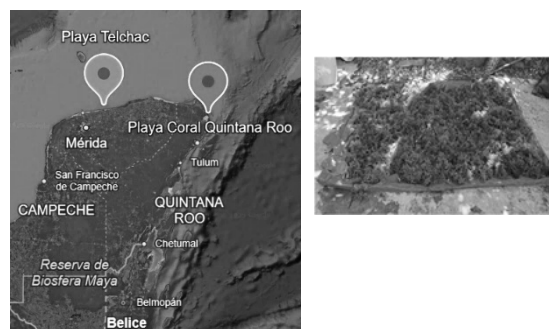


Figura 1. (Lado izquierdo) Ubicación de los puntos de muestreo de las especies *S. Fluitans* y *S. Natans* en Playa de Telchac y Playa de Quintana Roo, México. (Lado derecho) Secado de sargazo de la especie *S. Fluitans*.

2.2. Determinación de parámetros fisicoquímicos (PF)

Los parámetros fisicoquímicos se determinaron para ambas especies, cada prueba se realizó por triplicado. El pH se realizó mediante la diferencia de potencial de la muestra en disolución 1:10 en agua como disolvente. Se realizaron evaluaciones considerando la norma NMX- AA- 008- SCFI-2016 [13] y usando el medidor de pH Orion 2 Star. Se realizó el análisis conforme a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 [14] de la cantidad de sólidos totales (ST), sólidos fijos (SF) y Sólidos volátiles (SV) para *S. Fluitans* y *S. Natans*. El proceso consistió en un análisis gravimétrico y la ecuación (1), se empleó para el cálculo de los ST, donde M_2 se refiere a la masa de la muestra después de la evaporación y M_1 masas de la muestra inicial.

$$ST \left[\frac{mg \text{ de ST}}{Kg \text{ residuo}} \right] = \frac{M_2}{M_1} * 1,000,000 \quad (1)$$

Para la determinación de los SF y los SV se empleó un horno LabTech, y se emplearon las ecuaciones (2) y (3), donde M_3 es la masa de la muestra posterior a la calcinación

$$SF \left[\frac{mg \text{ de SF}}{Kg \text{ residuo}} \right] = \frac{M_3}{M_1} * 1,000,000 \quad (2)$$

$$SV \left[\frac{mg \text{ de SV}}{Kg \text{ residuo}} \right] = \frac{M_1 - M_3}{M_1} * 1,000,000 \quad (3)$$

Se realizó el análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) conforme a la norma NMX-AA-030/2-



SCFI-2011 [15], mediante el método de oxidación y absorbancia. Se preparó una disolución 1:100 usando agua como disolvente, se tomaron alícuotas de 2.5 mL de las disoluciones de las muestras y del blanco de referencia (agua destilada). El análisis de azúcares totales (AT) se realizó a partir de una dilución 1:100 empleando agua como disolvente, mediante el método de fenol-ácido de acuerdo con la técnica de Dubois [16]. Esta técnica consiste en emplear fenol al 5% y 5 mL de H_2SO_4 y para la curva de calibración se empleó glucosa como estándar. En ambas pruebas se usó el espectrofotómetro DLAB SP-UV 1000.

2.3 Potencial Bioquímico de metano (BPM) del sargazo

Se determinó el PBM para ambas especies de *Sargassum spp.* de acuerdo con la técnica reportada por Angelidaki [17]. Los reactores fueron de un volumen de 250 mL tipo lote, los cuales fueron alimentados empleando como biomasa el sargazo al 10% de ST, a un pH de 8, con una solución de sales, solución de fosfatos para cultivo basal y solución de bicarbonato, además se preparó un blanco de referencia con glucosa como control positivo. Los reactores fueron incubados en condiciones mesofílicas a 37°C por un periodo total de 20 días, en los cuales se determinó el Potencia Bioquímico de Metano (PBM) y se cuantificó el biometano empleando una probeta invertida. Se cuantificó los parámetros fisicoquímicos de DQO al inicio y al final de la determinación de PBM.

2.4 Modelo cinético

El metano acumulado producido en el experimento por lotes se simuló utilizando la ecuación de Gompertz modificada (Ec. 1), donde $Y(t)$ representa la producción de metano acumulativo (mL), t es el tiempo en días de digestión, P_{max} es el rango máximo de producción (mL/DQO), la variable λ representa la duración de la fase de retraso, que se cuantifica en días (d), e es el número de Euler, el dato obtenido se ajustó a el coeficiente de correlación. Excel versión de Microsoft Office Professional Plus 2013 fue usado para la determinación de λ .

$$(x) = P_{max} * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_{max} * e}{P} * \lambda - t \right] \right\} \quad (4)$$

5. Resultados y análisis de resultados

5.1. Parámetros fisicoquímicos

Los valores obtenidos del pH para la especie *S. Natans* tuvo un carácter neutro de 6.880 ± 0.06 , por otra parte, el pH de la especie *S. Fluitans* tuvo un valor alcalino de 8.092 ± 0.04 .

Para el análisis de pH, la especie *S. Natans* tiene un pH que puede considerarse bajo.

Se obtuvo que la cantidad de ST para *S. Natans* es de 881.82 ± 8.4 g de SF por kg de residuo, mientras que *S. Fluitans* obtuvo 869.75 ± 1.3 g de SF por kg de residuo, esto indica que la cantidad de materia sólida para ambas especies tiene una variación del 1.37%. El análisis experimental mostró una diferencia entre ambas especies, la muestra de *S. Natans* obtuvo 336.81 ± 5.2 g de SF por kg de residuo, mientras que *S. Fluitans* obtuvo 194.27 ± 6 g de SF por kg de residuo. Con respecto a los sólidos totales (ST), observamos que no existe una diferencia en cuanto a la cantidad de materia presente, lo cual indica que este parámetro es indistinto sin importar la especie. Por otra parte, se observa que los sólidos fijos (SF) presentan una mayor variación entre especies (variación de 42.3% de SF), siendo que la especie *S. Natans* presentan una mayor cantidad de este parámetro, lo que indica que una mayor proporción de compuestos inorgánicos presentes en la especie [18]. El análisis mostró que la especie *S. Natans* contiene 663.19 ± 5.2 y *S. Fluitans* 805.73 ± 58 g de SV por kg de residuo, lo que nos indica que existe una variación de 21.5% siendo que, la especie *S. Fluitans* contiene una mayor cantidad de SV en comparación a la otra especie. Por otra parte, los SV presentan un cambio en la composición de la macroalga, en la especie *S. Fluitans* se presenta una mayor cantidad de sólidos orgánicos no solubles [18] en comparación con *S. Natans*. En relación con los SF y SV, se esperaba una mayor producción de metano en *S. Fluitans* al presentar una concentración de estos sólidos más alta a la homóloga, por lo que sugiere que existen compuestos que dificulten la etapa de hidrólisis y fermentación para la macroalga [19], por lo que se recomienda un pretratamiento para favorecer la producción de metano [20].

Los valores obtenidos del análisis respecto a la DQO en la especie *S. Natans* de 79.93 ± 9.9 g O_2 por litro y 43.43 ± 1.9 g O_2 por litro para *S. Fluitans*. Los resultados sugieren que *S. Natans* contiene una mayor concentración de compuestos inorgánicos y orgánicos complejos liberados, comparada con su homóloga, lo que sugiere un mayor requerimiento de oxidante químico para su degradación en el medio [21]. Se determinó que para la especie *S. Natans* presenta 604.6 ± 4.2 mg por litro de AT y 633.6 ± 8.5 mg por litro para *S. Fluitans*. Los datos obtenidos en la determinación de AT sugieren que la cantidad de azúcar presente es equivalente en ambas especies, teniendo una variación de 4.8 %, por lo que la cantidad de azúcar es



indistinta de la especie y se sugiere que la producción de metano será similar para ambas muestras [22].

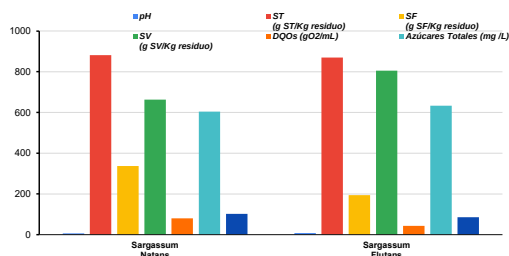


Figura 3. Parámetros fisicoquímicos determinados para ambas especies de *Sargassum* spp.

5.2. Producción de metano a partir de DA

El PBM resultante para ambas especies se muestra en la Figura 2, resaltando que la especie *S. Natans* presenta una mayor producción de metano al término del periodo de evaluación, 27.7 mL por día, en comparación con *S. Fluitans* la cual generó 17.1 mL al día, lo que representa una diferencia de producción del 38.16%.

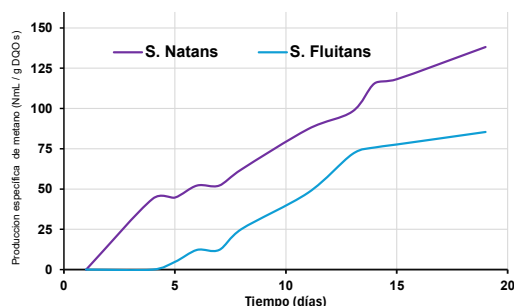


Figura 2. Producción de metano específica durante periodo de 20 días

La variación en cuanto al PBM en ambas especies, esta determinado por sus parámetros fisicoquímicos de cada una. Si analizamos los resultados obtenidos, podemos hacer un análisis enfocado en la producción de biometano, se puede observar un comportamiento en cuanto a el resultado de DQO, en este se determina que existe una mayor cantidad de compuestos inorgánicos e inorgánicos presentes en *S. Natans*, lo que indica que requiere condiciones específicas para oxidar dichos compuestos [22,23]. Se realizó la prueba de t student obteniendo como resultado un $p > 0.05$, por lo que, no hay una diferencia significativa de la producción de metano respecto a la especie. El análisis en relación con los AT presentes en las muestras de *Sargassum* spp. si bien presentan una ligera variación del 4.8%, teniendo una mayor

concentración *S. Fluitans*, se esperaría un incremento ligeramente superior en la producción de metano, no obstante, la baja concentración de DQO e interferencia por compuestos en la etapa de hidrólisis y fermentación [19,20,24].

La variable de pH antes y después de DA se mantuvo en el intervalo de 8.2 a 7.3. Respecto al análisis de la DQO, se determinó que la concentración de DQO en cada especie, tuvo una remoción de 31% para *S. Natans* y 86% para *S. Fluitans*, esto indica que el proceso de DA, disminuyó la materia orgánica presente al inicio de la DA.

2.4 Modelo cinético

En la Tabla 1, se muestra los resultados de P_{max} y R_{max} , se obtuvieron para ambas especies. Respecto a λ , es menor para *S. Natans*, de 2.2 d junto con una mayor P_{max} de 138.25 (NmL/gCOD_{in}). Valores de R_2 superiores a 0,99 para ambos pretratamientos indican que la producción de metano puede simularse adecuadamente (Tabla 1). De igual forma la investigación muestra que el aprovechamiento de este tipo de biomasa tiene la capacidad de producir metano mediante la DA.

Tabla 1. Producción de metano en periodo de 20 días

Especie	P_{max} (NmL/gCOD _{in})	R_{max} (mL/ d)	λ (d)	R^2
<i>S. Natans</i>	138.25	8.27	2.2	0.999
<i>S. Fluitans</i>	85.49	5.18	4.6	0.999

6. CONCLUSIONES

El análisis de las especies *S. Fluitans* y *S. Natans*, es indispensable para el aprovechamiento de este recurso que ha generado afectaciones en diversos sectores. Los resultados obtenidos ofrecen información necesaria para plantear, desarrollar y evaluar diversos proyectos. Sin embargo, solo se determinó que hay una mayor concentración inicial de la DQO para *S. Natans* que se ve reflejado en un menor tiempo de latencia y una mayor producción.

REFERENCIAS

- [1] López Contreras, A. M., Nuñez, P., Driegen, J., & Celis García, B. (2022). *Sargassum* in Mexico: From environmental problem to valuable resource. Wageningen University & Research. <https://doi.org/10.18174/574423>



- [2] Basic Information on Sargassum | US EPA. (2025, 5 febrero). US EPA. <https://www.epa.gov/habs/basic-information-sargassum>
- [3] Magaña-Gallegos, E., García-Sánchez, M., Graham, C., Olivos-Ortiz, A., Siuda, A. N., & Van Tussenbroek, B. I. (2022). Growth rates of pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*, 185, 103614. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2022.103614>
- [4] The Sargasso Sea. (2024, 31 enero). ArcGIS StoryMaps. <https://storymaps.arcgis.com/stories/d2cf0fbaa6b4beaa62a7317d81433ac>
- [5] González, I. E. L., Constantino, C. A. L., & Pérez, P. A. L. (2023). La invasión de sargazo: de un problema ambiental a un área de oportunidad. *Tópicos de Investigación En Ciencias de la Tierra y Materiales*, 10(10), 18-26. <https://doi.org/10.29057/aactm.v10i10.11236>
- [6] Azuz-Adeath, I. (2020). Governance and Management of Coasts and Ocean in the face of uncertainty. *A Guide for Decision Makers*. <https://doi.org/10.26359/epomex.0120>
- [7] Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, 365(6448), 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
- [8] Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 1, 35-48. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
- [9] Rehman, M. L. U., Iqbal, A., Chang, C., Li, W., & Ju, M. (2019). Anaerobic digestion. *Water Environment Research*, 91(10), 1253-1271. <https://doi.org/10.1002/wer.1219>
- [10] Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 15(10), 2224. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- [11] Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances In Bioscience And Biotechnology*, 06(03), 205-212. <https://doi.org/10.4236/abb.2015.63020>
- [12] Uddin, M. M., & Wright, M. M. (2022). Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances. *Physical Sciences Reviews*, 8(9), 2819-2837. <https://doi.org/10.1515/psr-2021-0068>
- [13] Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio ambiente y recursos naturales (COTEMARNAT). (2016). Análisis de agua- medición de pH en aguas naturales, residuales Y residuales tratadas – método de prueba (cancela A la nmx-aa-008-scfi-2011). Gobierno de México. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-aa-008-scfi-2016/>
- [14] Secretaría de Economía. (2015). Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba (cancela A la nmx-aa-034-scfi-2001). Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- [15] Secretaría de economía. (2011). Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales Y residuales tratadas - método de prueba - parte 2 - determinación del índice de la demanda química de oxígeno método de tubo sellado A pequeña escala. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>
- [16] Núñez, R. Á., Pérez, B. R., Motezak, R. H., & Chirinos, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en Agave cocui Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129-135. <https://biblat.unam.mx/hevila/Multiciencias/2012/vol12/no2/1.pdf>
- [17] Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, 59(5), 927-934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- [18] Avalos, G. A. T., & González, E. A. L. (2017). Disminución de sólidos de aguas grises mediante un proceso de aireación. *Ra Ximhai*, 393-404. <https://doi.org/10.35197/rx.13.03.2017.23.gt>
- [19] Charry Londoño, N. (2023). Evaluación del potencial bioquímico de metano de la cáscara de naranja mediante procesos de digestión anaerobia empleando pretratamiento hidrotérmico [Universidad Católica de Manizales]. <https://repositorio.ucm.edu.co/server/api/core/bitstreams/c66e077d-e47c-42bc-a50e-284cdb71515b/content>
- [20] Parra Ortiz, D. L., Álzate Gaviria, L. M., & Sánchez-Torres, V. (2022). Evaluación del proceso de digestión anaerobia del sargazo pelágico y su escalamiento en dos etapas utilizando transferencia directa de electrones entre especies (DIET) [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán]. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/2126/1/PCER_M_Tesis_2022_David_Leonardo_Parra_Ortiz.pdf





- [21] Arias, A. N. A., Calle, J. R., Villaseñor, E. A., & Hernández, J. A. (2012). Remoción foto catalítica de DQO, DBO5 y COT de efluentes de la industria farmacéutica. *REVISTA POLITÉCNICA*, 8(15), 9-17. <https://biblat.unam.mx/hevila/Revistapolitecnica/2012/no15/1.pdf>
- [22] Arango, A. C. (2016). Relación entre el potencial bioquímico de metano y la actividad enzimática medida con la técnica de Miller en inóculos anaerobios de purín de vacuno [Universidad Politécnica de Valencia]. En U. <https://n9.cl/937m8y>
- [23] Cleves, L. M. C., Orobio, B. A. P., Lozada, P. T., & Franco, C. H. V. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, 29(1), 95-108. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>
- [24] González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., & Yáñez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- [16] Comité Consultivo Nacional De Normalización De Medio Ambiente Y Recursos Naturales. (2003, 14 octubre). Protección ambiental. - Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Gobierno de México. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-004-semarnat-2002/>
- [21] Arias, A. N. A., Calle, J. R., Villaseñor, E. A., & Hernández, J. A. (2012). Remoción foto catalítica de DQO, DBO5 y COT de efluentes de la industria farmacéutica. *REVISTA POLITÉCNICA*, 8(15), 9-17. <https://biblat.unam.mx/hevila/Revistapolitecnica/2012/no15/1.pdf>.





Conversión biotecnológica de pérdidas y desperdicios alimentarios de una cafetería escolar para el impulso de bioproductos

ROBERTO A. MARTÍNEZ HERNÁNDEZ¹, ZAIRA MEJÍA REGALADO², ELIER EKBERG NERI TORRES³, SELENE M. GARCÍA SOLARES^{4,5}

¹Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional, Lindavista, Gustavo A. Madero, 07700 Ciudad de México, México

²Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional, Av. Wilfrido Massieu, Adolfo López Mateos S/N, Nueva Industrial Vallejo, Gustavo A. Madero, 07738 Ciudad de México

³Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Departamento de Ingeniería en Sistemas Ambientales. Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Av. Wilfrido Massieu 399, Col. Nueva Industrial Vallejo, C.P. 07738 Alcaldía Gustavo A. Madero CDMX, México.

⁴Centro Mexicano de la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto S/N, Ticomán, Gustavo A. Madero, 07340 Ciudad de México, México

⁵Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles (LaNDACBio), 07340 Ciudad de México, México

Autor de Correspondencia: Selene M. García Solares (e-mail: sgarcias@ipn.mx).

Los autores agradecen al proyecto SIP: 20254500 del Instituto Politécnico Nacional. La autora Zaira Mejía Regalado agradece al Instituto Politécnico Nacional por la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI)

RESUMEN Desde el punto de vista ambiental, las pérdidas y desperdicios de alimentos generan una huella ecológica significativa. Frente a esta problemática, la valorización de los residuos orgánicos mediante bioprocesos emerge como una alternativa viable para convertir el desperdicio en recursos útiles como los biocombustibles. El objetivo del presente proyecto es desarrollar un proceso de conversión biotecnológica de las Pérdidas y Desperdicios de Alimentos (PDA) inevitables generados en una cafetería escolar, orientado a la obtención de biopolímeros y bioetanol como bioproductos de interés industrial, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono. Se recolectaron y analizaron residuos alimentarios preconsumo generados en la cafetería escolar de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología durante un periodo de seis semanas, los cuales fueron procesados mediante reactores anaerobios fermentativos consolidados. En ellos se determinó la concentración de azúcares reductores mediante el método de ácido 3,5-dinitrosalicílico y la de proteínas por el método de Bradford, aplicando curvas estándar de glucosa y albúmina sérica bovina, respectivamente. La presencia de azúcares reductores es fundamental en la producción de bioetanol, ya que actúan como sustrato fermentable durante la conversión microbiana. Por su parte, el contenido proteico contribuye como fuente de nitrógeno para los microorganismos involucrados en el proceso, influyendo en la eficiencia fermentativa. Los resultados obtenidos permitirán evaluar el

potencial de estas PDA como materia prima en la producción de biocombustibles líquidos, promoviendo un modelo de aprovechamiento energético en entornos escolares y reduciendo el impacto ambiental del desperdicio de alimentos.

PALABRAS CLAVE: residuos orgánicos, fermentación, sostenibilidad, biocombustibles, bioprocesos.

1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos urbanos representa uno de los principales retos ambientales, sociales y económicos en las grandes ciudades. En la Ciudad de México, cada habitante produce en promedio 2 kilogramos de residuos al día, lo que suma cerca de 13 mil toneladas diarias. Este volumen representa un gasto público considerable, con un presupuesto anual superior a los 2,200 millones de pesos destinados al manejo de residuos, lo que equivale a aproximadamente \$0.50 por kilogramo y \$340 pesos por persona al año [1].

Desde el punto de vista ambiental, la PDA genera una huella ecológica significativa, contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación de suelos y cuerpos de agua, así como a la degradación de ecosistemas naturales. Frente a esta problemática, la valorización de los



residuos orgánicos mediante bioprocesos emerge como una alternativa viable para convertir el desperdicio en recursos útiles, entre ellos, los biocombustibles. En este contexto, la producción de bioetanol a partir de residuos alimentarios se perfila como una estrategia sostenible que permite reducir el impacto ambiental, diversificar las fuentes de energía y promover una economía circular.

Los polihidroxialcanoatos (PHA) son un grupo de polímeros biodegradables de origen biológico y los PHA son sustitutos atractivos de los plásticos petroquímicos convencionales para evitar los problemas de contaminación y tener propiedades materiales similares a varios termoplásticos.

Se utiliza enormemente en medicina debido a su naturaleza no tóxica, también se aplica en farmacia, agricultura, industria alimentaria e incluso como materia prima para productos químicos enantioméricamente puros y la industria de la pintura.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Desarrollar un proceso de conversión biotecnológica de pérdidas y desperdicios alimentarios inevitables generados en una cafetería escolar, orientado a la obtención de biopolímeros y bioetanol como bioproductos de interés industrial, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las pérdidas y desperdicios alimentarios (PDA) inevitables generados en una cafetería escolar del IPN, con base en su composición fisicoquímica y potencial fermentativo.
- Establecer un proceso fermentativo para la obtención de biopolímeros y etanol con un sustrato sintético que simule las características de los PDA.
- Evaluar la producción de biopolímeros y bioetanol a partir de PDA reales mediante un bioproceso consolidado, con énfasis en su eficiencia y potencial para disminuir la huella de carbono.

3. HIPÓTESIS

- Las PDA inevitables generadas en una cafetería escolar del IPN contienen una composición rica en compuestos fermentables que permite su uso como sustrato en procesos biotecnológicos.
- Un sustrato sintético formulado con base en la caracterización de PDA puede simular adecuadamente

su comportamiento en fermentaciones, permitiendo la optimización previa del proceso.

- La aplicación de un bioproceso consolidado con PDA reales permite la coproducción eficiente de biopolímeros y bioetanol en condiciones controladas.
- La conversión biotecnológica de PDA en bioproductos reduce la huella de carbono del sistema de gestión de residuos en la cafetería escolar respecto a la disposición convencional.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se plantea que mediante un proceso bioconsolidado se lleve a cabo la transformación de materia prima recolectada en una cafetería escolar en bioproductos, con especial interés en bioetanol y biopolímeros con aplicaciones industriales.



FIGURA 1. Diagrama de flujo que representa los pasos de la metodología aplicada para este trabajo.

4.1. Recolección, clasificación, separación y cuantificación de PDA

Como materia prima se utilizaron residuos alimentarios preconsumo provenientes de una cafetería escolar. Se estableció contacto con la cafetería de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI-IPN) para su recolección durante seis semanas consecutivas. Los desechos se componen principalmente por cáscaras de melón, sandía, zanahoria, plátano, limón, jitomate, cebolla, pimienta morrón, hojas de lechuga y hojas de Jamaica. Los residuos se secaron en la estufa a 60°C durante 24 horas. Una vez secos, los residuos se trituraron en un molino de cuchillas hasta obtener un polvo homogéneo.

Para liberar los azúcares fermentables, se realizó una hidrólisis ácida utilizando ácido sulfúrico al 1.5 % (v/v), manteniendo una relación sólido/líquido de 1:10. La mezcla se esterilizó por autoclave a 121°C durante 15 minutos. Posteriormente, el hidrolizado fue neutralizado con NaOH 5 M hasta alcanzar un pH de 6.0 ± 0.2 . El líquido fue filtrado mediante papel Whatman N° 1 y centrifugado a 8000 rpm



por 10 minutos para eliminar sólidos remanentes. El sobrenadante fue reservado como medio base para la fermentación.

4.2. Proceso fermentativo para la obtención de biopolímeros y etanol con un sustrato sintético que simule las características de los PDA.

Para promover la conversión simultánea de azúcares a bioetanol y la acumulación intracelular de PHA se utilizó una cepa comercial de *Saccharomyces cerevisiae*. El cultivo iniciador se preparó en medio YM (extracto de levadura 3 g/L, peptona 5 g/L, glucosa 10 g/L, extracto de malta 3 g/L) y se incubó a 30°C, 150 rpm durante 24 h. La fermentación se llevó a cabo en un biorreactor de 2 L, cargado con 1.5 L del sobrenadante de PDA como medio, suplementado con 1 g/L de NH_4Cl y 0.5 g/L de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. El inóculo se adicionó al 10 % v/v.

Se mantuvieron condiciones de temperatura de 30°C, pH 5.5 (controlado con NaOH 1 M), aireación de 1 vvm y agitación de 200 rpm. La fermentación se llevó a cabo durante 72 horas. Se promovió simultáneamente la conversión de azúcares a bioetanol y la acumulación intracelular de PHA [3].

Determinación de proteínas

El contenido proteico se evaluó mediante el método de Bradford [5], empleando una curva estándar de albúmina sérica bovina (BSA). Las muestras se midieron por duplicado y la absorbancia se registró a 595 nm.

Determinación de azúcares reductores

La concentración de azúcares reductores se determinó mediante el método DNS [7], utilizando una curva estándar de glucosa. Las muestras fueron analizadas por duplicado y la absorbancia se midió a 540 nm.

Biomasa

La biomasa microbiana fue cuantificada por espectrofotometría midiendo la densidad óptica a 600 nm (OD_{600}), utilizando un espectrofotómetro UV-Vis. Este método permite estimar la concentración celular en suspensión de manera indirecta, conforme a lo descrito en APHA [12] y Madigan et al. [13].

pH

El pH de las muestras fue determinado utilizando un potenciómetro digital (Hanna Instruments, modelo HI2211),

previamente calibrado con soluciones buffer estándar de pH 4.01, 7.00 y 10.01. Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, introduciendo el electrodo directamente en la muestra homogenizada. Cada lectura fue realizada por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los datos.

Cuantificación de bioetanol

El sobrenadante de cultivo fue filtrado y analizado por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) equipada con detector de índice de refracción (RID). Se utilizó una columna Aminex HPX-87H con ácido sulfúrico 0.005 M como fase móvil, a un flujo de 0.6 ml/min y 65 °C. La concentración de bioetanol se determinó mediante una curva estándar [8].

4.3. Extracción de polihidroxialcanoatos (PHA)

La biomasa se recuperó por centrifugación a 8000 rpm por 10 min y se lavó dos veces con agua destilada. El pellet seco fue tratado con una mezcla 1:1 (v/v) de hipoclorito de sodio comercial (al 6 %) y cloroformo, a razón de 2 mL por 100 mg de biomasa seca. La mezcla se incubó a 37 °C por 6 horas con agitación suave.

Posteriormente, la fase orgánica (cloroformo) fue recuperada y precipitada mediante la adición de cuatro volúmenes de metanol frío. La solución fue mantenida a -20 °C durante 30 minutos, seguida de una centrifugación a 10,000 x g por 5 minutos. El pellet de PHA fue secado en campana extractora hasta peso constante y conservado para su análisis [9].

4.4. Derivatización y análisis por GC-MS

El PHA seco fue sometido a metanólisis ácida. Se mezclaron 10 mg de PHA con 2 mL de una solución metanol: H_2SO_4 : cloroformo (85:15:1 v/v/v) en un vial de vidrio herméticamente cerrado. La reacción se llevó a cabo a 100 °C por 3 horas. Tras enfriar, se añadieron 2 mL de agua destilada y se extrajo la fase cloroformo (inferior). Esta fase fue filtrada mediante filtro de PTFE de 0.22 μm y almacenada en viales para inyección en el cromatógrafo.

El análisis se realizó en un sistema GC-MS equipado con una columna DB-5MS (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm). Las condiciones fueron: temperatura del inyector 280 °C, modo splitless, flujo de helio a 1 ml/min. El horno inició a 100 °C (1 min), con una rampa de 10 °C/min hasta 280 °C, manteniéndose 5 min. El espectrómetro operó en modo EI, escaneando entre 40 y 600 m/z. La identificación de monómeros como 3-hidroxibutirato se realizó comparando con patrones comerciales y bibliotecas espectrales [10].





5. RESULTADOS

Para representar la generación de biogás a partir de la guayaba, es necesario modelar la digestión anaeróbica de la materia orgánica presente en la fruta. La guayaba está compuesta principalmente por agua, carbohidratos, proteínas y grasas, pero para simplificar, se puede considerar su materia orgánica seca y utilizar la ecuación de Buswell, que describe la conversión de compuestos orgánicos en biogás (metano, CH_4 , y dióxido de carbono, CO_2) durante la digestión anaeróbica.

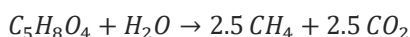
Composición de la guayaba y suposiciones

- Se considera **1 gramo de guayaba fresca**, que tiene aproximadamente un **80% de agua**, por lo que la **materia seca es de 0.2 g**.
- La materia seca se compone principalmente de materia orgánica. Basado en datos promedio de biomasa vegetal, la composición elemental de la materia orgánica de la guayaba se aproxima a la fórmula empírica $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$ (carbono 45%, hidrógeno 6%, oxígeno 48% en base seca, ignorando cenizas y otros componentes).
- Masa molar de $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$: 132 g/mol.
- Se asume que toda la materia orgánica se convierte en biogás según la ecuación de Buswell, aunque en la práctica hay ineficiencias en el proceso digestivo.

5.1 Ecuación química de referencia

La ecuación de Buswell para este estudio se puede deducir con la fórmula de la materia orgánica $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$ donde (a=5, b=8, c=4).

La ecuación balanceada es:



5.2 Cálculos para 1 gramo de guayaba fresca

Masa de materia orgánica ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$) en 1 g de guayaba fresca:

- Materia seca = 0.2 g (asumiendo 20% de materia seca).
- Se considera que toda la materia seca es $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$, por lo que masa de $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$ = 0.2 g.

Moles de $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$:

$$\text{Moles} = \frac{0.2 \text{ g}}{132 \text{ g/mol}} = 0.001515 \text{ mol}$$

Producción de metano (CH_4):

- De la ecuación, 1 mol de $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$ produce 2.5 mol de CH_4 .

$$\begin{aligned} \text{Moles de } \text{CH}_4 &= 0.001515 \text{ mol} \times 2.5 = 0.0037875 \text{ mol} \\ \text{O Volumen de } \text{CH}_4 &\text{ a condiciones estándar} \\ &\text{(0°C y 1 atm, donde 1 mol = 22.4 L):} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de } \text{CH}_4 &= 0.0037875 \text{ mol} \times 22.4 \text{ L/mol} \\ &= 0.08484 \text{ L} = 84.84 \text{ mL} \end{aligned}$$

Producción de dióxido de carbono (CO_2):

- De la ecuación, 1 mol de $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$ produce 2.5 mol de CO_2 .

$$\text{Moles de } \text{CO}_2 = 0.001515 \text{ mol} \times 2.5 = 0.0037875 \text{ mol}$$

- Volumen de CO_2 a condiciones estándar:

$$\begin{aligned} \text{Volumen de } \text{CO}_2 &= 0.0037875 \text{ mol} \times 22.4 \text{ L/mol} \\ &= 0.08484 \text{ L} = 84.84 \text{ mL} \end{aligned}$$

Volumen total de biogás:

- El biogás es una mezcla de CH_4 y CO_2 . En este caso, la relación molar es 1:1, por lo que el volumen total es:

$$\begin{aligned} \text{Volumen total} &= 84.84 \text{ mL} + 84.84 \text{ mL} = 169.68 \text{ mL} \\ &\approx 170 \text{ mL} \end{aligned}$$

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Estos hallazgos confirmaron el potencial de los residuos como sustrato, justificando la investigación a mayor escala sobre la producción de biogás.

Para 1 gramo de guayaba fresca, se estima una producción de aproximadamente 170 mL de biogás a condiciones estándar, con una composición de 50% CH_4 y 50% CO_2 . Esta es una estimación teórica; en la práctica, la producción real puede ser menor debido a factores como la eficiencia del reactor, la presencia de componentes no degradables y las condiciones operativas.

7. CONCLUSIONES

La valorización de las pérdidas y desperdicios de alimentos (PDA) inevitables generados en una cafetería universitaria demuestran ser una manera ambiental y socialmente viable. La caracterización fisicoquímica de las PDA demuestra potencial como materia fermentable, permitiendo la producción de bioproductos como el bioetanol y biopolímeros mediante un bioproceso consolidado a través del uso de residuos alimentarios preconsumo como cascara de melón, sandía, zanahoria, plátano, limón, jitomate, cebolla, pimienta morrón, hojas de lechuga y hojas de Jamaica. Este aprovechamiento de materia permite reducir la huella de carbono y presión sobre los sistemas de gestión de residuos además de impulsar los modelos de economía circular. Este modelo es a pequeña escala, sin embargo, sienta las bases para poder ser replicado y generar oportunidades con otras instituciones educativas ya que los





resultados muestran que las PDA pueden aprovecharse como recurso de manera industrial, ofreciendo una alternativa sostenible y contribuyendo al desarrollo de soluciones ante los retos ambientales actuales.

8. REFERENCIAS

- [1]. SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México). Informe sobre la generación de residuos sólidos urbanos y costos asociados. Ciudad de México; 2023.
- [2]. Sathiyarayanan G, Seghal Kiran G, Selvin J, Saibaba G. Optimization of polyhydroxybutyrate production by marine *Bacillus megaterium* MSBN04 under solid state culture. *Int J Biol Macromol*. 60:253–61. (2013) 10.1016/j.ijbiomac.2013.05.031.
- [3]. Zhang J, Shishatskaya EI, Volova TG, da Silva LF, Chen GQ. Polyhydroxyalkanoates (PHA) for therapeutic applications. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 106:110289. (2020) 10.1016/j.msec.2019.110289.
- [4]. Li Z, Yang J, Loh XJ. Polyhydroxyalkanoates: opening doors for a sustainable future. *NPG Asia Mater*. 14(1):1–20. (2022) 10.1038/s41427-022-00362-1.
- [5]. Rajeshwari KV, Balakrishnan M, Kansal A, Lata K and Kishore VVN, *State of the art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment*. *Renewable and sustainable energy reviews* 4:135-156 (2000). 10.1016/s1364-0321(99) 00014-3.
- [6]. Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem*. 72(1–2):248–54.(1976) 10.1016/0003-2697(76)90527-3
- [7]. Miller GL. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal Chem*. 1959;31(3):426–8.
- [8]. da Silva GP, Mack M, Contiero J. Production of ethanol from sugarcane bagasse hydrolysate by *Saccharomyces cerevisiae*: Effects of nutrients supplementation. *Biomass Bioenergy*. 2014;69:48–56.
- [9]. Hahn SK, Chang YK, Kim BS, Chang HN. Optimization of microbial poly(3-hydroxybutyrate) recovery using dispersions of sodium hypochlorite solution and chloroform. *Biotechnol Bioeng*. 1994;44(2):256–61.
- [10]. Kumar P, Ray S, Kalia VC. Production of biodegradable plastics from biomass. In: Singh RL, editor. *Principles and applications of environmental biotechnology for a sustainable future*. Singapore: Springer; 2018. p. 145–62.
- [11]. American Public Health Association (APHA). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. Washington, DC: APHA; 2017.
- [12]. Madigan MT, Bender KS, Buckley DH, Sattley WM, Stahl DA. *Brock biology of microorganisms*. 15th ed. New York: Pearson; 2018.
- [13]. American Public Health Association (APHA). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. Washington (DC): APHA; 2017.
- [14]. Madigan MT, Bender KS, Buckley DH, Sattley WM, Stahl DA. *Brock biology of microorganisms*. 15th ed. New York: Pearson; 2018.





Martínez Hernández Roberto Alejandro. Egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas con especialidad en Química Analítica en la CDMX, México. Cursó la educación media superior en el Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos #1 “Gonzalo Vázquez Vela”. Su línea de investigación se centra en el aprovechamiento de residuos orgánicos para la obtención de biopolímeros y biocombustibles con enfoque en sostenibilidad y economía circular. Actualmente participa en proyectos relacionados con la recolección y valorización de pérdidas y desperdicio de alimentos en cafeterías universitarias en el Centro Mexicano para la Producción más limpia.



Zaira Mejía Regalado cursa actualmente el octavo semestre de la carrera de Ingeniería en Negocios Energéticos Sustentables (INES) en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad (UPIEM). Desde el año 2024, ha participado como becaria del programa BEIFI, destacándose por su responsabilidad y compromiso. Es una persona autodidacta, con iniciativa para ampliar sus conocimientos de forma independiente, y asiste regularmente a ponencias, conferencias y eventos relacionados con la sustentabilidad y otros temas vinculados a su área de estudio. Su principal objetivo es convertirse en una gran profesional, por lo que se dedica constantemente a su desarrollo personal y académico, demostrando un genuino interés por su formación integral.





Diseño de un sistema modular para el tratamiento de agua con energía solar

NATHALIA ZAVALA ORTEGA¹, JULIO VALLE HERNÁNDEZ¹, VÍCTOR CASTILLO JIMENEZ²

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Apan, Hidalgo, 43920, México

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, CDMX, 04510, México

Autor de Correspondencia: Nathalia Zavala Ortega (e-mail: za374888@uaeh.edu.mx).

RESUMEN El agua es un recurso fundamental para el desarrollo humano, pues resulta indispensable en los procesos fisiológicos y en las actividades cotidianas, lo que exige un abastecimiento seguro. Sin embargo, la contaminación, el uso intensivo y, con frecuencia, poco eficiente de este recurso han provocado un suministro insuficiente de agua potable, afectando el desarrollo socioeconómico de muchas comunidades. Ante esta problemática, se han buscado soluciones sostenibles que garanticen la disponibilidad continua del recurso, entre las cuales el tratamiento de aguas residuales se presenta como una alternativa viable. No obstante, el uso de grandes plantas de tratamiento resulta poco accesible para la mayoría de las personas debido a su tamaño, costo y elevado consumo energético. Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema modular de tratamiento de aguas grises alimentado con energía solar fotovoltaica, destinado a su reutilización en actividades secundarias. El sistema está diseñado para operar en comunidades con acceso limitado a infraestructura, priorizando la compacidad y la sostenibilidad.

Se propone un diseño modular en el que el número de módulos se determina en función de las características del agua residual y su uso secundario. En este trabajo se presenta el diseño hidráulico de los módulos de tratamiento, así como el cálculo energético requerido para su operación autónoma mediante energía solar. Los procesos asociados al tratamiento incluyen filtración física, adsorción, filtración por membrana y desinfección mediante luz ultravioleta (UV) y ozono. Posteriormente, se integraron los módulos al sistema fotovoltaico, lo que permite su funcionamiento autónomo.

Como resultados se presenta la cantidad de agua tratada en un día, la energía requerida por cada módulo, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, la evaluación energética global del sistema y su impacto en términos de huella hídrica.

PALABRAS CLAVE: Tratamiento de aguas grises, Sistema modular, Sostenibilidad, Energía solar fotovoltaica.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable constituye un elemento esencial para el desarrollo humano y el progreso socioeconómico. No obstante, la creciente presión sobre los recursos hídricos, derivada del uso ineficiente y la contaminación, ha provocado escasez en diversas regiones del país, especialmente en aquellas con infraestructura limitada, lo que intensifica la necesidad de implementar estrategias sostenibles para el tratamiento y la reutilización del agua.

Ante este panorama, la reutilización de aguas grises se presenta como una estrategia viable para mitigar el estrés hídrico. Sin embargo, las plantas de tratamiento convencionales requieren una gran infraestructura de gran escala y presentan elevados costos de operación, lo que dificulta su implementación en comunidades rurales o regiones con recursos limitados.

En este contexto, el presente trabajo propone el diseño y evaluación de un sistema modular para el tratamiento de agua grises, alimentado mediante energía solar, con el propósito de facilitar su implementación en entornos con difícil acceso a servicios básicos. El sistema permite reutilizar agua tratada en actividades secundarias, bajo un enfoque de sostenibilidad, eficiencia energética y adaptabilidad.

El diseño del sistema de tratamiento de agua está conformado por cuatro módulos: filtración física y adsorción, filtración por membrana, y desinfección mediante radiación UV y ozono. Cada módulo es evaluado energéticamente con el fin de alimentarlo mediante energía solar fotovoltaica. El arreglo fotovoltaico, encargado de suministrar energía al sistema, se dimensiona de tal forma que garantice su autonomía por dos días, considerando su operación en una escuela.





2. METODOLOGÍA

a metodología empleada para el desarrollo de este proyecto integra el análisis de la calidad de las aguas grises, el diseño conceptual del sistema modular de tratamiento y la evaluación energética para su operación autónoma mediante energía solar. El trabajo se estructuró en cinco etapas, descritas a continuación:

I. Caracterización de aguas grises.

Se realiza una revisión bibliográfica y análisis de datos previos sobre la calidad típica de aguas grises escolares, con el objetivo de establecer criterios de diseño y seleccionar los procesos de tratamiento adecuados para su reúso en actividades secundarias.

II. Estimación del caudal.

La estimación del caudal generado se determina a partir de referencias bibliográficas y parámetros.

Este cálculo permite definir la capacidad hidráulica del sistema, así como dimensionar los componentes para cada uno de los módulos.

III. Diseño del sistema modular.

A partir de los requerimientos de tratamiento de agua identificados, se plantea el diseño de un sistema modular compuesto por: un módulo de filtración física y adsorción, un módulo de filtración por membrana, un módulo de desinfección mediante UV y un módulo de desinfección mediante ozono.

IV. Estimación del consumo energético.

Para cada módulo se identifican los consumos de energía por componente; bomba, lámparas UV, generador de ozono y se estima el consumo energético diario.

V. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo.

A partir del consumo energético estimado, se dimensiona un sistema fotovoltaico que garantice la autonomía del sistema por dos días.

3. DESARROLLO

3.1. Caracterización de aguas grises

El análisis se enfoca en parámetros representativos que permiten establecer las condiciones iniciales del agua a tratar y fundamentar la selección de procesos dentro del sistema modular.

Entre los parámetros evaluados se encuentran:

- pH: Medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una solución. Indica una variabilidad que depende del tipo de actividad y productos de limpieza en el agua. Los valores oscilan entre 6 y 8.5
- Turbidez: Se debe a la presencia de partículas sólidas, jabones y residuos orgánicos, cuyos niveles pueden superar los 100 NTU (Unidad Nefelométrica de Turbidez).
- Sólidos suspendidos totales (SST): Dependen del grado de dilución y el uso de agua, presentan concentraciones que pueden variar entre 50 y 300 mg/L.
- Demanda química de oxígeno (DQO): Reflejan la presencia de compuestos orgánicos no biodegradables con valores entre 100 y 800 mg/L.
- Demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅): Indica una carga orgánica moderada y el potencial de biodegradación del agua con un rango estimado de 30 a 300 mg/L, lo cual.

Estos datos permiten establecer los requerimientos mínimos que debe cumplir el sistema modular para garantizar un tratamiento efectivo.

3.2. Estimación del caudal

La estimación del caudal generado se determinó a partir de los reportes de consumo escolar emitidos por la CONAGUA, considerando un consumo promedio de 20 litros de agua por persona al día. Para el dimensionamiento hidráulico del sistema, se calculó el caudal promedio generado por una escuela primaria ubicada en una comunidad rural, equivalente a la descarga de aguas grises de aproximadamente 300 personas durante un período de 12 horas.

El volumen diario de agua a tratar generado por las instalaciones se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_{diario} = N * \dot{V}_p f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} - e^{-g x}} \quad (1)$$



Donde:

N: Número de personas

$\dot{V}_p$: Consumo estimado de agua por persona

Y el caudal promedio se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{prom} = \frac{V_{diario}}{t_{jornada}} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (2)$$

$t_{jornada}$: 12 horas.

3.3. Diseño del sistema modular

En la figura 1 se muestra el diseño del sistema de tratamiento de agua.

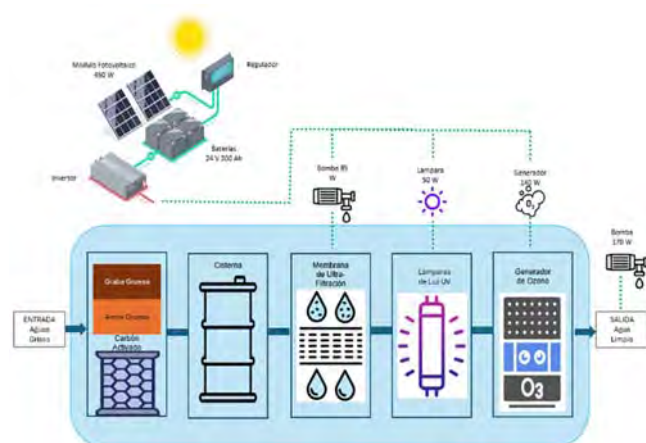


FIGURA 1.

De acuerdo con las características del agua a tratar, se consideran cuatro módulos para lograr un tratamiento completo. Sin embargo, dependiendo del nivel de contaminación, uno o dos módulos pueden omitirse.

Para el tratamiento de agua se considera un depósito de almacenamiento inicial destinada a recolectar las aguas grises generadas durante la jornada. Este depósito permite regular el caudal de entrada al sistema de tratamiento, facilitando una operación continua.

El proceso de tratamiento de agua por cada uno de los módulos se describe a continuación:

I. Módulo de filtración física y de adsorción:

Este módulo consta de un filtro en la parte superior de grava sílica de 1/8 y arena sílica de 20/30, los cuales cumplen la función de retener partículas grandes y sólidos suspendidos. Elimina sólidos gruesos y reduce significativamente la turbidez del agua, aunque sin remover compuestos químicos ni microorganismos. Posteriormente se propone un filtro de carbón activado para la parte inferior del módulo, debido a que contiene millones de microporos capaces de atrapar moléculas contaminantes como cloro residual, detergentes y jabones; es importante para la eliminación de olores.

II. Módulo de filtración por membrana.

En este módulo se propone una membrana microporosa semipermeable de ultrafiltración, capaz de retener virus, bacterias, turbidez y otros microorganismos presentes en agua grises. Permite alcanzar un nivel de pureza de hasta el 99%, garantizando mayor seguridad biológica.

III. Módulo de desinfección UV

La desinfección mediante radiación UV actúa inactivando microorganismos al penetrar su pared celular dañando su ADN y ARN, interrumpiendo la reproducción microbiana. (Para ello se propone una lámpara de emisión luz UV-C (254nm) proporcionando una dosis germicida de 30 mJ/cm^2 . Se pone en el cálculo.)

IV. Módulo de desinfección mediante Ozono

Este módulo complementa la desinfección del agua mediante la generación de ozono a partir de descargas eléctricas controladas. El gas generado se introduce en el sistema de tratamiento, donde es dispersado en el agua en forma de burbujas, completando así el proceso de purificación.

Una vez tratada, el agua es almacenada en un tinaco que facilita la recirculación del agua, desde el cual puede ser redistribuida para su uso secundario.

3.4. Estimación del consumo energético

Para determinar la energía eléctrica necesaria para el sistema de tratamiento de agua, se realiza la estimación de consumo energético diario de los componentes involucrados para este proceso.



El primer módulo, filtración física y por adsorción consiste en un sistema multilecho de tipo FlowGuard que opera por gravedad, por lo tanto, no requiere consumo eléctrico.

El segundo módulo, filtración por membrana requiere de una bomba que permita el flujo de agua a través de la membrana. El caudal de operación de la bomba correspondiente al almacenamiento previo al tratamiento.

El caudal de operación de bomba 1 se obtiene de la siguiente manera:

$$Q_{op} = \frac{V_{diario}}{t_{operación}} f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (3)$$

Donde

$t_{operación}$: 4 horas

Con este caudal se determina la potencia de la bomba mediante la siguiente ecuación:

$$W_{bomba 1} = \frac{\Delta P * Q_{op}}{\eta} f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (4)$$

Donde:

ΔP : Presión de operación de la membrana

η : Eficiencia de la bomba

El tercer módulo, desinfección por luz UV-C (254nm) proporcionando una dosis germicida de 30 mJ/cm^2 . Comercialmente este tipo de lámpara opera con una potencia de 50 Watts y un tiempo mínimo de exposición de 40 segundos para $1.8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$. El caudal de agua tratada en este módulo es el mismo que el requerido en el módulo de filtración por membrana (ecuación (3)).

El último módulo, tratamiento corresponde a la desinfección con Ozono que utiliza un equipo generador BPDNA-10GCE-D-25MGL que tiene un consumo energético de 140 Watts en 20 minutos para un volumen de $2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.

Para el módulo de almacenamiento final se considera una bomba que eleva el agua tratada a un tinaco a 6 metros de altura.

El caudal de operación para la bomba 2 se obtiene de la ecuación (3) cambiando el tiempo de operación a 1 hora.

Se calcula la potencia de la bomba con la siguiente ecuación:

$$W_{bomba 2} = \frac{\rho * g * Q_{op2} * H}{\eta} f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (5)$$

Donde:

ρ : Densidad

g : Gravedad

Q_{op2} : Caudal de operación para bomba 2

H : Altura

η : Eficiencia de la bomba

3.5. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Se debe considerar la geografía del lugar, en este caso se considera una escuela en la comunidad de Chimalpa Tlalayote, Hidalgo debido a que cumple con características de desabasto y baja infraestructura.

Para satisfacer la demanda energética total de sistema, estimada en 620 Wh/día, se realiza el dimensionamiento fotovoltaico considerando las condiciones de irradiación solar de 5.04 kWh/m^2 .

Para obtener la energía solar producida en un día por el sistema fotovoltaico se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_{eléctrica solar} = \frac{E_{total}}{HSP * 0.8} f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (6)$$

Donde:

E_{total} : Energía total

HSP : Horas Solar Pico

Para almacenar la energía generada y cubrir el funcionamiento en caso de no contar con el recurso solar por 2 días, se incorporan baterías. Este almacenamiento permite asegurar el suministro continuo y confiable del sistema ante condiciones con ausencia de radiación. La capacidad de las baterías se calcula con la siguiente ecuación:





$$Batería_{capacidad} = \frac{E_{total}}{Voltaje\ de\ la\ batería} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (7)$$

En este caso E_{total} se considera para los dos días de autonomía.

Sin embargo, para que esta energía pueda ser almacenada en las baterías se requiere un inversor que convierte la energía de corriente continua (DC) producida por los paneles a corriente alterna (AC).

$$Inversor_{DC} = \frac{P_{AC}}{Voltaje\ de\ la\ batería \cdot \eta} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (8)$$

Donde

P_{AC} : Potencia nominal del inversor

η : Eficiencia del inversor

Para que el sistema sea eficiente y funcional, se implementa un regulador que protege y gestiona la carga que llegará de los paneles a las baterías para evitar daños al sistema.

$$Regulador_{Corriente} = \frac{Potencia\ total\ paneles}{Voltaje\ de\ la\ batería} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (9)$$

Este dimensionamiento asegura un balance óptimo entre generación, almacenamiento y consumo energético, proporcionando un sistema eficiente y con capacidad suficiente para el correcto funcionamiento.

4. RESULTADOS

Para considerar el agua pura se deben considerar características específicas establecidas por la NOM-127-SSA1-2021 y las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En términos físico-químicos, el agua pura debe presentar una apariencia limpia y transparente, sin turbidez ni coloración perceptible, manteniendo un pH de 7. Sólidos totales disueltos (TDS) inferiores a 50 mg/L, lo que garantiza una baja dureza y la ausencia de contaminantes inorgánicos en niveles dañinos. la turbidez no debe exceder de 1 NTU para evitar la presencia de partículas suspendidas.

En cuanto a la calidad microbiológica, el agua debe estar exenta de bacterias coliformes, especialmente escherichia

coli, así como de virus, parásitos y otros microorganismos patógenos que puedan representar un riesgo.

Para garantizar la operación continua de los equipos de bombeo, filtración y desinfección, es necesario considerar el consumo energético que tendrán al día, presentados en la tabla 1.

TABLA 1. Consumo energético

Descripción	Valor
Bomba 1	800 Watts-hora
Lámpara luz UV	1200 Watts- hora
Generador de Ozono	840 Watts-hora
Bomba 2	1000 Watts-hora

Para cubrir el consumo energético diario, se considera el siguiente sistema fotovoltaico:

- 2 paneles solares de 480 W cada uno.
- Energía generada estimada por día: aproximadamente 5200Wh/día, lo cual cubre el consumo diario y permite la carga eficiente de las baterías.
- Almacenamiento: 4 baterías LiFePO₄ de 12 V / 65 Ah, proporcionando aproximadamente 1.56 kWh de almacenamiento.
- Regulador: 30 A, compatible con sistemas de 12V / 24V.
- Inversor: 300 W, 60 Hz, entrada DC 12 V, salida de onda senoidal.

El sistema se considera energéticamente autosuficiente, gracias a la adecuada relación entre el consumo energético, la energía generada y la capacidad de almacenamiento. La eficiencia en el uso energético permite que el sistema funcione sin necesidad de conexión a la red eléctrica, lo que representa una solución viable en zonas rurales o de difícil acceso.

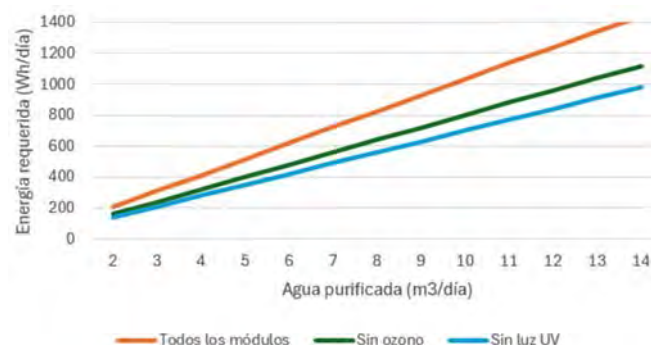
La capacidad del sistema para tratar esa cantidad de agua representa un avance en la gestión responsable del recurso hídrico, lo que representa una disminución significativa de la huella hídrica asociada al tratamiento y consumo de agua.

No obstante, el funcionamiento del sistema puede variar en función del nivel de pureza requerido para el agua. En los



casos donde el agua presente baja contaminación, no será necesario activar la totalidad de los módulos de tratamiento, sino únicamente aquellos indispensables para garantizar la calidad del recurso. Por el contrario, en situaciones con mayor grado de impurezas, será necesario emplear todos los módulos disponibles. Asimismo, el sistema puede adaptarse a diferentes caudales de operación, lo cual permite atender a poblaciones de distinto tamaño. Esta flexibilidad implica una variación en el consumo energético, ya que el gasto de energía se encuentra directamente relacionado tanto con el número de módulos como con el volumen de agua a tratar, como se observa en la gráfica 1.

TABLA 1. Agua purificada vs energía requerida



En la gráfica 1 se muestra la relación entre el volumen de agua purificada por día y la energía eléctrica requerida para el funcionamiento del sistema de filtración. Se observa que, al incrementar el caudal tratado, la energía necesaria crece de manera lineal, debido a que el consumo específico de cada módulo se mantiene constante.

Asimismo, al analizar escenarios de operación sin ciertos módulos, se observa una reducción significativa en el consumo energético, siendo más evidente el caso de quitar la lámpara de luz UV. Estos resultados permiten visualizar de manera clara la dependencia entre el caudal de agua purificada y la energía requerida, así como el impacto de cada módulo en el consumo total del sistema.

La huella hídrica se entiende como el volumen de agua dulce utilizada para sostener procesos humanos. En este caso, el tratamiento descentralizado de agua evita procesos intensivos de agua. Al no depender de traslados largos e infraestructura compleja, se reduce el gasto de agua asociado a pérdidas por fugas o procesos secundarios.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo de este sistema autónomo de tratamiento de agua, alimentado por energía solar, demuestra una solución viable, eficiente y sostenible para el manejo descentralizado del recurso hídrico. Su diseño permite tratar hasta 6 000 litros de agua al día, con un consumo energético de 620 Wh/día, completamente cubierto por un sistema fotovoltaico con almacenamiento para dos días de autonomía.

La principal contribución de este trabajo radica en la integración de tecnologías de tratamiento y desinfección (física, UV y ozono) con fuentes de energía renovable, lo que reduce significativamente la huella hídrica y propone un modelo replicable en comunidades sin acceso a red eléctrica o con escasez de agua.

Este sistema tiene potencial de aplicación en zonas rurales, sistemas de emergencia, escuelas y espacios comunitarios, y podría ampliarse para el tratamiento de aguas grises o pluviales. Como trabajo futuro, se sugiere la evaluación de eficiencia microbiológica en campo, así como el análisis económico y del ciclo de vida del sistema, con el fin de fortalecer su implementación a mayor escala.

REFERENCIAS

- [1]. McNeece, R. (2020). Participación de la electricidad fotovoltaica en México hacia el año 2050. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(2), 123-145.
- [2]. López, E., Martínez, M., & Ruiz, J. (2017). Apuntes de la energía fotovoltaica en México. *Revista de Energía Solar*, 15(3), 45-60.
- [3]. Norma Oficial mexicana NOM-127-SSA1-2021 (DOF) – agua.org.mx. (2022, 2 mayo). Recuperado de <https://agua.org.mx/biblioteca/norma-oficial-mexicana-nom-127-ssa1-2021-dof/>
- [4]. Alonso Abella, M. (2004). Introducción al diseño y dimensionado de instalaciones de energía solar fotovoltaica. Ediciones S.A.P.T. Publicaciones Técnicas S.L.
- [5]. de la Peña, M. E., Ducci, J., & Zamora Plascencia, V. (s.f.). Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Agua y Saneamiento.
- [6]. González Rosas, A., González Islas, J., Miranda Gómez, J., & Godínez Garrido, G. (2016). Diseño e instalación de un sistema fotovoltaico de 10 kW. *Compendio de Investigación Academia Journals Los Mochis*.

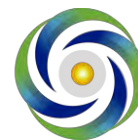


- [7]. Institutodelaguaes. (2024, 16 enero). Contaminantes de las Aguas Residuales: Un Peligro Silente en Nuestro Medioambiente | Instituto del Agua. Recuperado de <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/contaminantes-de-las-aguas-residuales-aguas-residuales/>
- [8]. Secretaría de Energía. (2015). Perspectivas del sector eléctrico 2009-2024. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico.
- [9]. Secretaría de Energía. (2009). Balance Nacional de Energía 2008. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico.
- [10]. DuPont. (s.f.). IntegraTec™ PVDF-UF Out-In P Series Process & Design Manual. DuPont Water Solutions.
- [11]. ITM Filters. (2021, junio). *Manual del usuario: Filtros de arena*. <https://itmfilters.com/wp-content/uploads/2021/06/Manual-de-usuario-FCR.pdf>
- [12]. Filtración por membrana y cómo aprovecharla en tratamiento agua. (2024, 27 de mayo). *Aqua*. <https://www.aqua.com.mx/blog/que-es-la-filtracion-por-membrana-y-como-se-aprovecha-en-el-tratamiento-del-agua8ae22a9e>
- [13]. Veolia. (s. f.). Sistemas de rayos UV Aquaray para el tratamiento de agua. Veolia. <https://www.veoliawatertechnologies.com>
- [14]. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (s. f.). Estadístico SINAV [Base de datos].
- [15]. 基亚拉迪. (2024, 7 de agosto). Activated charcoal in water filtration – Driplife. <https://driplifecorp.com/es/activated-charcoal-in-water-filtration/>
- [16]. CloudFront. (s. f.). Media Book Spanish [PDF]. https://d2zm9amfddap0m.cloudfront.net/media/resources/Media%20Book%20Spanish.pdf?utm_source
- [17]. Biopurificadores. (s.f.). Generador ozono concentración estándar BPDNA-10GCE-D-25MGL
- [18]. Krannich Solar México: Dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico. (s. f.). Recuperado de <https://krannich-solar.com/mx.es/blog/dimensionamiento-de-un-sistema-solar-fotovoltaico/>

Nathalia Zavala Ortega.

Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Tecnologías del Frío de la Escuela Superior de Apan perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Este trabajo fue desarrollado como parte del proyecto “Diseño de Sistemas de Refrigeración y Climatización Sustentable” del Cuerpo Académico de Ingeniería en Tecnología del Frío





Innovación en biodiésel: cavitación transitoria y estándares ASTM para combustibles sostenibles

ERICK O. CAMACHO¹, ALEJANDRA GONZÁLEZ CASTRO¹, FRANCISCO A. GODINEZ², RICARDO CORTEZ¹, BRUNO VIVEROS¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Escolar 04360, C.U., Coyoacán, Ciudad de México, CDMX, México, C.P. 04510

² Coordinación de Sistemas Mecánicos, Energéticos y de Transporte, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, Ciudad de México, México

Autor de Correspondencia: Erik O. Camacho (e-mail: erikcamacho@ingenieria.unam.edu).

Este tema se desarrolla bajo el Programa PAPIME PEI13624 "Desarrollo y Mejora del Aprendizaje en Economía Circular de los Residuos". Asimismo, se realiza bajo el Proyecto LN-2025-C-53 "Estudio diagnóstico de la producción de combustible de aviación sostenible a partir de aceite usado de cocina para el fortalecimiento estratégico del eje de mapa de ruta del Plan México"

RESUMEN En el Laboratorio de Producción y Utilización de Biocombustibles (LAEL) se desarrolló biodiésel a partir de aceites vegetales usados mediante transesterificación con metanol y KOH. Esta reacción se intensificó aplicando cavitación transitoria, generada por pinzas bioinspiradas en las quelas del camarón pistola, que al cerrarse rápidamente crean zonas de baja presión. Una cámara MIRO 310s permitió registrar el fenómeno y medir velocidades mayores a 10 m/s, observándose burbujas de metanol alrededor de las pinzas. El proceso se realizó a 30, 40 y 50 °C, observándose que mayores temperaturas reducen el número de cavitación pero aumentan la conversión, alcanzando rendimientos superiores al 95%. El biodiésel fue purificado y caracterizado conforme a siete normas ASTM, evaluando viscosidad, punto nube, punto de inflamación, corrosión al cobre, agua y sedimentos, densidad relativa y residuos de carbono. Posteriormente, se mezcló con diésel fósil en proporciones B5 y B10, cumpliendo satisfactoriamente con las pruebas ASTM D86, D1298, D976 y D93. Los resultados confirman que la cavitación transitoria acelera la reacción y junto con la caracterización estandarizada, permite producir biocombustibles eficientes y aptos para motores diésel convencionales.

PALABRAS CLAVE: Cavitación transitoria, Transesterificación, Biodiésel B5/B10.

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte del biodiésel comercial se produce por transesterificación de grasas animales o aceite vegetal en presencia de alcohol y catalizadores a través de operaciones por lotes utilizando reactores de tanque agitado. La transesterificación consiste en tres reacciones consecutivas reversibles donde los triglicéridos son convertidos a diglicéridos, los diglicéridos a monoglicéridos y estos a glicerol (subproducto principal de la reacción). En cada etapa se usan tres moléculas de alcohol por molécula de triglicérido. Estequiométricamente se producen tres moles de éster por cada mol de triglicérido [1] como se indica de forma resumida en la Figura 1.

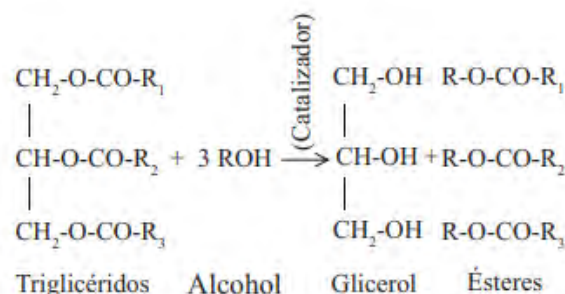


FIGURA 1. Reacción de transesterificación en la producción de biodiésel

Diversos estudios han identificado los parámetros críticos que influyen en la eficiencia del proceso de transesterificación para producir biodiésel. Leung y Guo [1] reportaron que a 60 °C y una relación molar metanol:aceite de 6:1, se obtiene un rendimiento del 90 %. Además,



observaron máxima conversión con 1.1 % de NaOH, 1.3 % de NaOCH_3 y 1.5 % de KOH, respectivamente. Por su parte, Banerjee y Chakraborty [2] señalaron que el incremento de temperatura mejora el rendimiento hasta el punto de ebullición del alcohol, y que un exceso de alcohol favorece la conversión. También concluyeron que mayores tiempos de reacción incrementan la eficiencia del proceso. Chozhavadhan y colaboradores [3] estudiaron el efecto de la agitación, indicando que 400 rpm durante 60 minutos optimiza la conversión, siendo esta variable sustituida en este trabajo por cavitación inducida mediante pinzas bioinspiradas. Finalmente, el costo del biodiésel depende de la materia prima: Liu et al. [4] y Maddikeri et al. [5] destacan que el uso de aceite comestible usado reduce costos y mejora la sostenibilidad, siendo una fuente rica en ácidos grasos útiles para la producción de biodiésel.

Cavitación transitoria

Los camarones pistola poseen una garra que puede medir hasta la mitad de su cuerpo. Al cerrarse rápidamente, esta garra genera una burbuja de cavitación que colapsa y produce un fuerte chasquido [6]. Versluis et al. [7] realizaron 108 experimentos con *Alpheus heterochaelis*, utilizando cámaras de alta velocidad (40,500 fps) y un hidrófono de 100 kHz. Observaron burbujas de cavitación esféricas de hasta 3.5 mm de radio que colapsaban a 3 mm de la garra. La velocidad angular de cierre fue de 3500 rad/s, con un chorro de agua de 25 m/s.

Posteriormente, Hess et al. [8] desarrollaron un modelo mecánico a escala 70:1 que imita la garra del camarón *Alpheus bellulus*. Aunque se formó una cavidad y un anillo de vórtice, la velocidad del flujo fue de solo 1 m/s, insuficiente para inducir cavitación en laboratorio con mezcla de agua y glicerina. Koukouvinis et al. [9] modelaron computacionalmente el cierre de la garra, utilizando un modelo de límite sumergido y el modelo de equilibrio homogéneo (HEM), mostrando que el chorro inducido produce vórtices capaces de generar cavitación si la velocidad es suficientemente alta.

Godínez et al. [10] fabricaron unas pinzas bioinspiradas con geometría tipo Venturi. El cierre se activó mediante bandas elásticas y se sumergió en agua. Se alcanzaron velocidades de flujo de 14.5 m/s, lo cual permitió la aparición de cavitación. Compararon varios parámetros adimensionales como el número de Reynolds (323,495) y el número de cavitación ($C_v = 0.732$), observando similitud con los valores naturales del camarón. Staack y Tang [11] desarrollaron un dispositivo bioinspirado que imita la generación de plasma del camarón *Alpheus formosus*

mediante impresión 3D y un sistema de resorte. El dispositivo permitió experimentar cavitación eficiente con generación de luz y ondas de choque.

Este trabajo propone el uso de pinzas mecánicas bioinspiradas en las quelas del camarón pistola como método innovador para inducir cavitación hidrodinámica transitoria, con el fin de intensificar la reacción de transesterificación alcalina para producir biodiésel. El sistema será escalado para operar en un volumen de 1.5 litros, con control de temperatura y frecuencia de cierres. Hasta donde se tiene conocimiento, no existen estudios previos que apliquen cavitación bioinspirada en pinzas de camarón a la producción de biodiésel, lo que representa una aportación original en el campo de los biocombustibles.

2. Metodología

La imagen muestra un diagrama de flujo del proceso experimental para producir biodiésel a partir de aceite comestible de desecho mediante transesterificación alcalina, bajo condiciones estándar: 400 RPM, 60 °C, 1 hora de reacción, relación molar metanol:aceite 6:1, catalizador KOH al 1 % y presión atmosférica.

La innovación del estudio consiste en reemplazar la agitación convencional por un sistema de cavitación hidrodinámica generado por pinzas bioinspiradas en las quelas del camarón pistola, las cuales inducen el colapso de burbujas para acelerar la reacción. Esta cavitación es controlada por la variable “cierres de pinzas por minuto”. Finalmente, se utiliza una cámara de alta velocidad (Phantom Miro M310) para capturar el fenómeno y verificar la efectividad del cierre de pinzas en la mezcla. El resultado esperado es la obtención de biodiésel, glicerina y metanol.

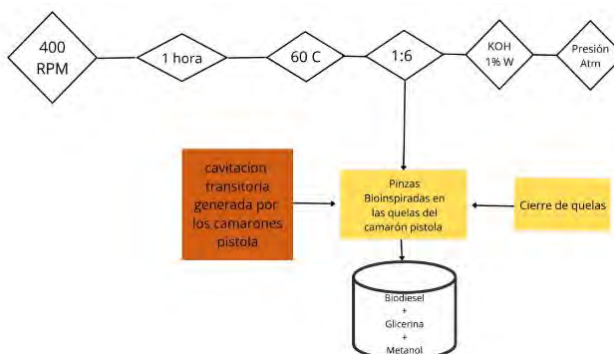


FIGURA 2. Diagrama de transesterificación por cavitación transitoria

Caracterización de Aceite usado de cocina

El aceite utilizado se recolectó de un restaurante ubicado en la zona centro de Texcoco, Estado de México. Para su caracterización se determinaron el índice de acidez, mediante titulación con KOH en etanol y fenolftaleína como indicador, expresado en mg de KOH por gramo de muestra, y el índice de saponificación, mediante hidrólisis alcalina con KOH en etanol y titulación con HCl estandarizado, expresado también en mg de KOH por gramo de aceite.

Obtención de la velocidad mediante cámara de alta velocidad Phantom Miro M310

La fotografía de alta velocidad es una herramienta fundamental en ingeniería e investigación experimental, ya que permite visualizar y analizar fenómenos dinámicos que ocurren en tiempos demasiado breves para ser captados por el ojo humano o por cámaras convencionales. En este estudio se utilizó la cámara Phantom Miro M310, un equipo compacto, ligero y robusto, que cuenta con una resolución de 1 megapixel y una capacidad de procesamiento de 3.2 gigapíxeles por segundo, con una velocidad de grabación de hasta 11,000 fotogramas por segundo (fps).

Para la caracterización del movimiento de pinzas mecánicas bioinspiradas en las quelas del camarón pistola, se grabó su cierre rápido en una pecera con una mezcla de aceite, metanol y KOH a temperatura ambiente. La Figura 3 muestra el arreglo experimental empleado durante las grabaciones. La medición de la velocidad del fluido inducido por el cierre de las pinzas se realizó mediante el software Phantom CineViewer (CV).



FIGURA 3. Arreglo experimental con las pinzas mecánicas bioinspiradas y la cámara Phantom Miro M310.

Reacción Estequiométrica

Se realizó un primer experimento siguiendo el proceso de producción de biodiésel convencional por transesterificación, el cual se presenta de forma resumida en la Figura 4. Este experimento se estableció como línea base para el estudio, con el propósito de contar con un punto de

referencia frente al cual comparar los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta en experimentos posteriores. Para ello, se emplearon las condiciones óptimas reportadas en la literatura para la reacción de transesterificación alcalina, que incluyen una relación molar aceite:metanol de 1:6, el uso de KOH como catalizador en una concentración del 1 % en peso respecto al aceite, un tiempo de reacción de una hora, una temperatura de operación de 60 °C y una velocidad de agitación constante de 400 rpm, de acuerdo con [1], [2] y [3].

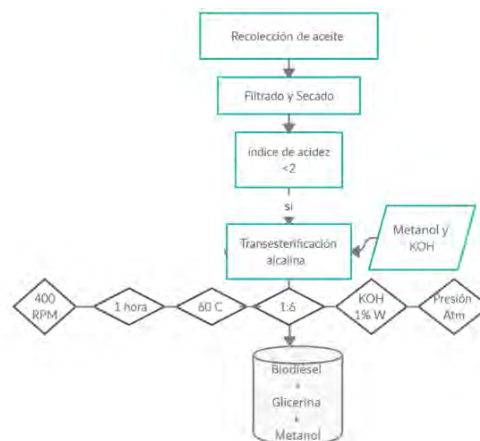


FIGURA 4. Esquema para producir biodiésel de manera convencional.

El objetivo de esta primera prueba fue cuantificar la producción de biodiésel, glicerina y metanol sin reaccionar, así como evaluar la calidad del biocombustible obtenido. Estos parámetros se compararán con los resultados de los experimentos posteriores.

Configuración experimental para producir biodiésel por medio de cavitación transitoria

Se sustituyó la operación de agitación, producida por el agitador magnético en el proceso convencional, por la cavitación transitoria generada mediante pinzas bioinspiradas en las quelas del camarón pistola. En este proceso experimental de cavitación hidrodinámica transitoria, obtenida por el cierre rápido de pinzas mecánicas, se mezclaron 6 moles de metanol con 1 % en peso de KOH. Posteriormente, la mezcla se añadió a 1 mol de aceite usado de cocina. A continuación, el contenido se transfirió al reactor de biodiésel, colocando las pinzas mecánicas dentro del vaso de precipitado, y se activó el mecanismo a una frecuencia de 400 cierres por minuto, operando durante 5 minutos seguidos por 1 minuto de descanso, hasta observar

la separación de fases de biodiésel y glicerina. Este procedimiento se realizó a temperaturas de 30 °C, 40 °C y 50 °C. Finalmente, la mezcla se dejó en reposo dentro de un embudo de decantación para permitir la separación completa de ambas fases, evaluándose posteriormente las eficiencias de conversión.

Caracterización fisicoquímica del biodiesel

El biodiésel se analizó en el Laboratorio de Producción y Utilización de Biocombustibles (LAEL) bajo 7 parámetros ASTM, con el propósito de evaluar sus propiedades fisicoquímicas y verificar su calidad. Los ensayos realizados incluyeron: punto de inflamación en copa cerrada (ASTM D93), densidad y gravedad API (ASTM D1298), viscosidad cinemática (ASTM D445), punto nube (ASTM D2500), corrosión al cobre (ASTM D130), residuos de carbono (ASTM D14530) y contenido de agua y sedimentos (ASTM D2709). Adicionalmente, el biodiésel obtenido fue enviado al Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles para la determinación del contenido de ésteres metílicos. Una vez caracterizado el biodiesel se procedió a mezclarlo en proporciones de 5% (B5) y (B10%). Se analizó estas mezclas bajo la norma de destilación ASTM D86, densidad relativa ASTM D1298, punto flash ASTM D93 e Índice de Cetano ASTM D976.

3. Resultados

Velocidad de con Cámara de alta velocidad Miro 310s

Se utilizó la cámara de alta velocidad Miro M310 para registrar, con precisión, el cierre rápido de las pinzas bioinspiradas en las quelas del camarón pistola. La captura se realizó a una velocidad de 11 001 cuadros por segundo, configurando un periodo de adquisición de 90 μs y un tiempo de exposición de 7 μs, lo que permitió visualizar con claridad el movimiento y los fenómenos generados durante el cierre. Las pinzas se instalaron en el interior de una pecera de acrílico, la cual fue llenada con una mezcla reactiva compuesta por 1.2 L de aceite de cocina usado, 300 mL de metanol y 10.8 g de KOH, asegurando que el volumen final cubriera por completo las pinzas para garantizar la transmisión homogénea de la energía generada.

En un experimento realizado con esta mezcla, que presenta una relación molar de 1:6:0.155, y manteniendo una temperatura de trabajo de 30 °C, se efectuó la medición de la velocidad de una partícula esférica de 0.0001 m de diámetro.

Esta partícula se encontraba situada a una distancia de 0.0004 m de las pinzas en el momento del cierre, obteniéndose una velocidad de desplazamiento de 10.73 m/s. El seguimiento del movimiento permitió determinar que la partícula recorrió una distancia de 0.0013 m.

En la Figura 5 se presentan dos imágenes representativas del experimento: en la parte izquierda, la vista general de las pinzas sumergidas en la mezcla reactiva, y en la parte derecha, la secuencia del desplazamiento de la partícula a lo largo de la distancia medida.



FIGURA 5. Pinzas de camarón pistola sumergidas en aceite comestible

Caracterización del aceite de cocina usado

Se midieron la densidad, el índice de acidez y el índice de saponificación del aceite comestible de desecho, estimándose a partir de este último el peso molecular promedio de los triglicéridos. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Producción y Utilización de Biocombustibles (LAEL). Para ello, se recolectaron 10 litros de aceite de cocina usado, los cuales fueron filtrados con una malla de acero inoxidable de calibre 40 y posteriormente calentados a 100 °C para eliminar la humedad. El índice de acidez se determinó conforme a la NMX-F-101-SCFI-2012, mientras que el índice de saponificación se utilizó para calcular el peso molecular promedio de los triglicéridos presentes en la muestra, empleando la siguiente ecuación:

$$PM = \frac{168\,300}{IS}, \quad (1)$$

PM = Peso molecular promedio del aceite (g/mol)

IS = Índice de saponificación (mg KOH/g de muestra)

168 300 = Constante derivada de la masa molar del KOH y el factor de conversión de unidades.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. Caracterización de ACD

Parametro	Valor	Unidades
Densidad	912	Kg/m ³
IA	1.72	mg KOH/g
IS	185	mg KOH/g
PM	910	g/mol

Transesterificación por el método convencional

Se realizó un primer experimento siguiendo el proceso convencional de producción de biodiésel por transesterificación. Se utilizó metanol con 99 % de pureza, el cual se mezcló con hidróxido de potasio (1 % en peso del aceite) en forma de lentejas, hasta lograr la completa disolución del KOH en el metanol. Paralelamente, el aceite se calentó a 60 °C. Posteriormente, se mezclaron el aceite y el metóxido de potasio a una velocidad de 400 rpm (agitador magnético) durante 1 hora, manteniendo la temperatura en 60 °C (parrilla eléctrica). A continuación, se procedió a la separación de las fases de biodiésel, glicerina y metanol sin reaccionar, utilizando un embudo de decantación. En la Figura 6 se muestra las etapas para la elaboración del biodiésel.



FIGURA 6. Producción de Biodiésel

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la medición de seis parámetros establecidos en la norma ASTM D6751. Los resultados obtenidos cumplen con los límites establecidos por dicha norma.

TABLA 2. Caracterización de biodiésel

Parametro ASTM	Valor	ASTM D6751	Unidades
D93	162	>130	°C
D445	4.52	1.9-6	mm ² /s
D2500	-2	Informar	°C
D4530	0.05	0.05	%
D130	1b	3	NA
D2709	0.01	0.05	%
Densidad	880	NA	g/cm ³

El punto de inflamación (162 °C) supera el mínimo requerido, indicando baja presencia de metanol residual y seguridad en su manejo. La viscosidad cinemática (4.52 mm²/s) se encuentra dentro del rango aceptado, asegurando una correcta atomización en los inyectores. El punto nube (-2 °C) evidencia un buen comportamiento en climas fríos. El contenido de residuos de carbono (0.05 %) está en el límite permitido, lo que refleja una conversión adecuada de triglicéridos. La corrosión al cobre (1b) está muy por debajo del valor máximo, evidenciando baja presencia de compuestos corrosivos. El agua y sedimentos (0.01 %) es muy inferior al límite, reduciendo riesgos de emulsiones y problemas de almacenamiento. Finalmente, la densidad (880 g/cm³) es adecuada para su uso como combustible. En conjunto, los valores obtenidos confirman que el biodiésel producido es de alta calidad y apto para su utilización en motores diésel.

Transesterificación por cavitación transitoria

El biodiésel obtenido mediante cavitación transitoria a 30, 40 y 50 °C fue evaluado en términos de calidad según los parámetros establecidos en la ASTM D6751, cuyos valores de referencia se presentan en la Tabla 2. El análisis demostró que, independientemente de la temperatura de reacción, las propiedades fisicoquímicas del biodiésel permanecieron dentro de los límites normativos, sin diferencias significativas entre las muestras producidas a distintas temperaturas. Esto indica que la variación de temperatura dentro del rango estudiado no afecta de manera notable la calidad final del producto, garantizando su aptitud para su uso como combustible.

Sin embargo, sí se observaron variaciones relevantes en la eficiencia del proceso, reflejadas en el número de cierres rápidos de las pinzas bioinspiradas y en el tiempo total de reacción requeridos para completar la transesterificación. A 30 °C, el proceso demandó 14 000 cierres rápidos en un tiempo total de 42 minutos, siendo la condición que más energía mecánica y tiempo requirió. Al aumentar la temperatura a 40 °C, el número de cierres se redujo a 10 000 y el tiempo total a 30 minutos, lo que representa una mejora significativa en eficiencia. Finalmente, a 50 °C, la reacción se completó con tan solo 8 000 cierres rápidos en 25 minutos, mostrando el menor consumo de energía mecánica y el tiempo de proceso más corto del estudio.

Estos resultados sugieren que la temperatura influye directamente en la cinética de la reacción, favoreciendo una conversión más rápida y eficiente a mayor temperatura, aunque sin comprometer la calidad final del biodiésel.



La Figura 7 resume estos resultados, mostrando cómo el aumento de la temperatura reduce tanto el número de cierres como el tiempo total de reacción.

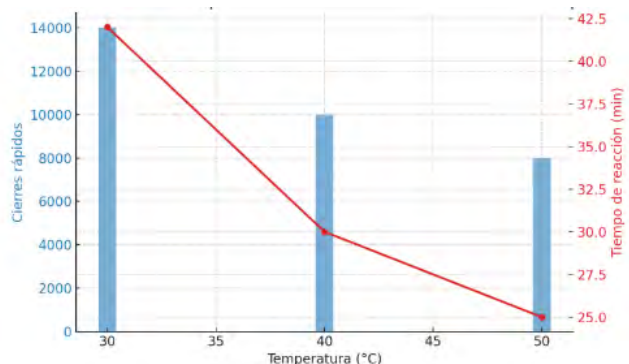


FIGURA 7. Producción de Biodiésel por cavitación transitoria

Caracterización de mezclas de biodiesel B5 y B10

El biodiésel producido se mezcló con diésel fósil en proporciones del 5 % (B5) y 10 % (B10). Estas mezclas fueron analizadas conforme a las pruebas de control que establece la NOM-016-CRE, que incluyen: destilación (ASTM D86), índice de cetano (ASTM D976) y punto de inflamación (ASTM D93).

TABLA 3. Caracterización de B5

Parametro ASTM	Valor	NOM 016	Unidad
D93	75	>45	°C
D976	55	>48	Unidad
D86(90)	355	>345	°C

TABLA 4. Caracterización de B10

Parametro ASTM	Valor	NOM 016	Unidad
D93	77	>45	°C
D976	56	>48	Unidad
D86(90)	356	>345	°C

Los valores obtenidos para B5 y B10 muestran que ambas mezclas cumplen de forma holgada con los requisitos de la NOM-016-CRE. El punto de inflamación supera ampliamente el valor mínimo de 45 °C, lo que garantiza seguridad en el manejo y almacenamiento. El índice de cetano está por encima de 48, asegurando un encendido eficiente y una combustión adecuada en motores diésel. Finalmente, la temperatura de destilación al 90 % volumen supera el mínimo de 345 °C, lo que indica una adecuada volatilidad y comportamiento en el sistema de inyección. Estos resultados confirman que la incorporación de biodiésel en un 5 % o 10 % no compromete la calidad ni el desempeño del combustible.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que es posible producir biodiésel de alta calidad a partir de aceite comestible de desecho, cumpliendo con los parámetros establecidos en la norma ASTM D6751. La aplicación del proceso convencional de transesterificación y la técnica alternativa de cavitación transitoria mostraron que, en términos de calidad físico-química, no existen diferencias significativas entre ambos métodos, cumpliendo en todos los casos con los requisitos para su uso como biocombustible.

Asimismo, se evidenció que el aumento de la temperatura durante el proceso de cavitación transitoria reduce el número de cierres rápidos de las pinzas y el tiempo de reacción necesario para completar la conversión, lo que representa una optimización energética y operativa. Las mezclas de biodiésel con diésel fósil en proporciones B5 y B10 también cumplieron con las pruebas de control establecidas por la NOM-016-CRE, manteniendo propiedades adecuadas de combustión, seguridad y desempeño, lo que confirma su viabilidad para uso comercial y en motores diésel.

En conjunto, este trabajo no solo valida la factibilidad técnica de producir biodiésel de calidad a partir de aceites residuales, sino que también aporta una alternativa innovadora y eficiente mediante cavitación transitoria, que podría escalarse industrialmente para reducir costos y promover el aprovechamiento sostenible de residuos grasos.

REFERENCIAS Y NOTAS DE PIE DE PÁGINA

Las referencias deben citarse de la siguiente forma:

Artículos

- [1]. Leung DYC and Guo Y, *Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production*. *Fuel Process Technol* 87(10):883-890 (2006). 10.1016/j.fuproc.2006.06.003.
- [2]. Banerjee A and Chakraborty R, *Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production—A review*. *Resources, Conservation and Recycling* 53(9):490-497 (2009). 10.1016/j.resconrec.2009.04.003.
- [3]. Chozhavendhan S, Vijay Pradhap Singh M, Fransila B, Praveen Kumar R and Karthiga Devi G, *A review on influencing parameters of biodiesel production and purification processes*. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* 1-2:1-6 (2020). 10.1016/j.crgsc.2020.04.002.





- [4]. Liu SH, Lin YC and Hsu KH, Emissions of regulated pollutants and PAHs from waste-cooking-oil biodiesel-fuelled heavy-duty diesel engine with catalyzer. *Aerosol Air Quality Research* 12:218-227 (2012). 10.4209/aaqr.2011.09.0144.
- [5]. Maddikeri G, Gogate P and Pandit A, Intensified synthesis of biodiesel using hydrodynamic cavitation reactors based on the interesterification of waste cooking oil. *Fuel Processing Technology* 137:285-292 (2014). 10.1016/j.fuproc.2015.04.035.
- [6]. Bohnenstiehl DR, Lillis A and Eggleston DB, The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: Temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal oyster reef habitat. *PLoS ONE* 11:e0143691 (2016). 10.1371/journal.pone.0143691.
- [7]. Versluis B, Schmitz A, von der Heydt A and Lohse D, How snapping shrimp snap: Through cavitating bubbles. *Science* 289:2114-2117 (2000). 10.1126/science.289.5487.2114.
- [8]. Hess D, Brücker C, Hegner F, Balmert A and Bleckmann H, Vortex formation with a snapping shrimp claw. *PLoS ONE* 8:e77120 (2013). 10.1371/journal.pone.0077120.
- [9]. Koukouvinis P, Brücker C and Gavaises M, Unveiling the physical mechanism behind pistol shrimp cavitation. *Scientific Reports* 7:14312 (2017). 10.1038/s41598-017-14312-0.
- [10]. Godinez F, Navarrete M, Chavez O and Guzman E, Transient Cavitation by Quick Closing Pincers. *10th International Symposium on Cavitation – CAV2018*, Baltimore, Maryland, USA, May 14–16 (2018).
- [11]. Tacias Pascacio VG, Rosales Quintero A and Torrestiana Sánchez B, Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 32(3):303-313 (2016). [fecha de consulta: 15 de agosto de 2025]. ISSN: 0188-4999. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37046488005>



Erik Camacho Villan. Es Técnico Académico Titular A en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en la Ciudad de México, México. Es mexicano y actualmente realiza el Doctorado en Energía, Procesos y Usos Eficientes de la Energía en la misma institución. Es Ingeniero Mecánico (2016) y Maestro en Ingeniería con especialidad en Energía, Procesos y Usos Eficientes de la Energía (2017) por la UNAM. Su área principal de investigación es la optimización de procesos de producción de biodiésel, particularmente mediante el uso de cavitación transitoria bioinspirada, así como el análisis físico-químico de combustibles bajo normas ASTM y NOM. Ha desarrollado y participado en proyectos de diseño, construcción y operación de equipos experimentales para el aprovechamiento energético, incluyendo un triturador de residuos húmedos y sistemas para la producción de biodiésel. Es autor de trabajos presentados en congresos nacionales e internacionales, y ha publicado artículos científicos en temas de ingeniería mecánica, energía y biocombustibles. Pertenece a la comunidad académica de la UNAM y ha sido reconocido por su labor docente e investigadora en el área de energía y combustibles alternativos.





Enfoques secuencial y simultáneo para la síntesis de redes usuarias de agua con integración térmica

HERNÁN T. CORTÉS-MONROY¹, JUAN M. ZAMORA-MATA²

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Energía, CDMX, 02200, México

²Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, CDMX, 09310, México

Autor de Correspondencia: Juan M. Zamora-Mata (e-mail: jmzm@xanum.uam.mx).

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Síntesis, Optimización y Simulación de Procesos (SOS) del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I). El primer autor desea agradecer el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti, México) por la beca otorgada para cursar el Doctorado en Ingeniería de Proceso en el Programa de Posgrado de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco (UAM-A).

RESUMEN La síntesis sustentable de redes de agua con integración térmica implementa estrategias de reúso de agua y recuperación de calor en los sistemas de proceso de la industria. En este trabajo se aborda la síntesis de una red de agua con integración térmica, para un caso de estudio de la literatura (1w4u3j) que incluye una fuente de agua dulce, 4 unidades de proceso usuarias de agua operando a diferentes temperaturas y 3 contaminantes. La síntesis se realiza con un enfoque secuencial que genera primero una red isotérmica que optimiza el consumo de agua; posteriormente, dicha red se evoluciona para satisfacer las temperaturas de operación requeridas en las unidades de proceso, favoreciendo la recuperación de calor y minimizando el uso de servicios auxiliares. Por otra parte, la síntesis de la red de agua para el caso de estudio también se desarrolla con un enfoque simultáneo; a través de la optimización de una superestructura de red que minimiza el costo total anual (CTA) del sistema y determina simultáneamente los niveles y esquemas óptimos de reúso de agua y recuperación de calor. Se comparan los dos diseños obtenidos, resaltando un menor CTA del diseño producido con el enfoque simultáneo.

PALABRAS CLAVE: Redes integradas de agua y energía, Uso eficiente de agua, Uso eficiente de energía, Síntesis secuencial, Síntesis simultánea.

1. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente de agua y energía en las industrias de proceso es de suma importancia, ya que el agua se utiliza para diversos fines, como agente reactivo, de separación o de limpieza; mientras que la energía se utiliza para cubrir la demanda de calor en las corrientes de proceso, así como también la contraparte, para remover calor residual. Una forma efectiva de abordar este problema es mediante la síntesis y el diseño de los sistemas que los utilizan, considerando esquemas efectivos de reúso de agua y de recuperación de calor. Dentro del área de la ingeniería de sistemas de proceso, la síntesis de redes de agua con integración térmica se ha mantenido activamente como un área de investigación de gran interés en las últimas dos décadas [1].

El objetivo de las redes usuarias de agua con integración térmica consiste en satisfacer la demanda de agua y calor en cada una de las operaciones que conforman un sistema de proceso dado. La calidad del agua en las operaciones usuarias de agua es importante, por lo que en las corrientes de agua a la entrada y a la salida de cada operación se imponen restricciones de concentraciones límite de contaminantes. Además, el agua también se requiere en cada operación a una temperatura preespecificada. Un criterio de diseño importante de este tipo de sistemas es el costo total anual (CTA) de la red, el cual considera los costos de operación asociados al consumo de agua y al consumo de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, así como los costos de capital de los equipos de transferencia de





calor requeridos para suministrar, recuperar y retirar energía en el sistema. En este trabajo se desarrollan tres diseños de red obtenidos mediante enfoques de síntesis diferentes para un caso de estudio reportado en la literatura [2], el cual considera una fuente de agua dulce ($w1$), cuatro operaciones usuarias de agua ($u1$) en las que se transfieren desde corrientes de proceso a las corrientes de agua, cargas másicas de tres contaminantes ($3j$); el cual denominaremos Caso de Estudio 1w4u3j. Con fines ilustrativos, se obtiene un primer diseño de red en el que no se considera el reúso de agua ni la recuperación de calor. El segundo diseño de red se desarrolla mediante un enfoque de síntesis secuencial en el que primero se considera el reúso de agua para obtener un diseño preliminar, el cual se evoluciona posteriormente considerando la recuperación de calor. El tercer diseño de red se desarrolla a partir de un enfoque de síntesis simultáneo, en donde el reúso de agua y la recuperación de calor se consideran de forma simultánea.

2. METODOLOGÍA

Se presentan los datos del Caso de Estudio 1w4u3j para el cual se desarrollan tres diseños diferentes de la red de agua. En la Tabla 1 se muestran los datos y costos unitarios de la fuente de agua dulce, de los servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, así como los costos de capital relacionados con los equipos de transferencia de calor (calentadores, recuperadores y enfriadores). En la Tabla 2 se muestran especificaciones nominales de diseño de las operaciones usuarias de agua.

2.1. Diseño de red de referencia

Se desarrolla un primer diseño de red en el que no se considera reúso de agua, ni recuperación de calor. Por lo tanto, las operaciones solo utilizan agua dulce para cubrir su demanda; y para alcanzar las temperaturas de operación y la temperatura final del efluente, se utilizan servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento. A partir de la Fig. 1 se desarrolla el modelo P1 de programación no lineal (PNL), cuya función objetivo, mostrada en la Ec. (1), considera los costos de operación asociados al consumo de agua, de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento y los costos de capital relacionados con los cinco calentadores y cinco enfriadores, incluidos en la Fig. 1. La función objetivo de la Ec. 1 está sujeta a las ecuaciones de i) balances de materia para el agua y los contaminantes y ii) balances de energía en torno a las operaciones usuarias de agua, los calentadores, enfriadores y el mezclador final, respectivamente. También se consideran las ecuaciones de diseño de los equipos de calentamiento y enfriamiento, las diferencias de temperaturas en los extremos calientes y fríos

y la media logarítmica de las diferencias de temperaturas, utilizando la aproximación de Chen [3] y cotas superiores e inferiores para todas las variables de decisión.

TABLA 1. Datos de operación y costos para el Caso de Estudio 1w4u3j [2]

Símb.	Descripción	Valor	Unidades
C_{w1}	Costo unitario fuente de agua 1, $w1$	0.375	\$/t
—	Temp. de $w1$	20	°C
OC_{hu}	Costo unitario serv. aux. de calentamiento, hu (vap. sat.)	377	\$(kW \cdot \text{año})
—	Temp. inicial de hu	120	°C
—	Temp. final de hu	120	°C
OC_{cu}	Costo unitario serv. aux. de enfriamiento, cu (agua de enf.)	189	\$(kW \cdot \text{año})
—	Temp. inicial de cu	10	°C
—	Temp. final de cu	20	°C
h_i	Coef. indiv. de transf. de calor para agua, hu y cu	1	$\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$
C_p	Capacidad calorífica específica del agua	4.2	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$
CC	Costo de cap. de los equipos de transf. de calor = $8,000 + 1,200[\text{Área}(\text{m}^2)]$		\$/año
T_{ef}	Temp. final del efluente	30	°C
H	Horas anuales de op. de la planta	8,000	h/año

TABLA 2. Datos de las operaciones usuarias de agua para el Caso de Estudio 1w4u3j [2]

Op.	Contaminante	Carga másica (kg/h)	Concn. máx. (ppm)		Temp. op. (°C)
			Entrada	Salida	
$u1$	A	2	0	100	40
	B	1	15	100	
	C	3	0	100	
$u2$	A	5	50	100	100
	B	0	100	200	
	C	15	30	250	
$u3$	A	30	100	800	75
	B	4	100	750	
	C	0	100	600	
$u4$	A	4	400	800	50
	B	22	380	800	
	C	17	250	800	

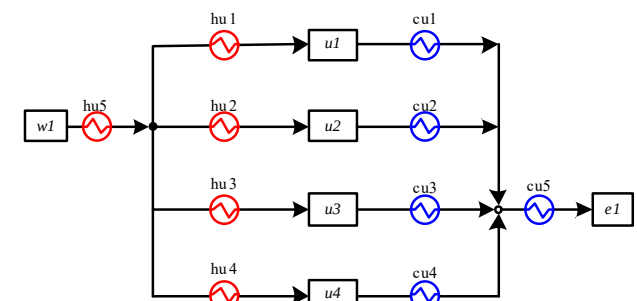


FIGURA 1. Superestructura de red sin reúso de agua ni recuperación de calor, para el Caso de Estudio 1w4u3j.



Modelo P1

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & H \cdot C_{wl} \cdot f_{wl} \\ & + \sum_{hu=1}^5 OC_{hu} \cdot q_{hu} + \sum_{cu=1}^5 OC_{cu} \cdot q_{cu} \\ & + \sum_{hu=1}^5 (8000 + 1200 \cdot A_{hu}^{0.6}) + \sum_{cu=1}^5 (8000 + 1200 \cdot A_{cu}^{0.6}) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde los sub-índices hu y cu identifican a los calentadores y enfriadores, respectivamente.

Sujeto a:

- Balances de materia para el agua y los contaminantes.
- Balances de energía
- Ecuaciones de diseño de los equipos de intercambio de calor
- Cotas superiores e inferiores para todas las variables de decisión.

El modelo P1 se resuelve adaptando una estrategia de multi-arranque estocástico (Fig. 2), desarrollada por Núñez-Serna y Zamora [4], utilizando CONOPT 3 [5] en el ambiente de modelado algebraico de GAMS 21.4; obteniendo el diseño de red que se muestra en la Fig. 3, con un CTA = 5,743,767.15 \$/año. Este diseño de red consume 43.056 kg/s de agua dulce, 9,668.75 kW y 7,860.417 kW de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, respectivamente. Este será el diseño de red de referencia para comparar los diseños de red obtenidos con los enfoques secuencial y simultáneo, así como los diseños de red reportados en la literatura.

2.2. Enfoque secuencial de diseño

El enfoque secuencial utilizado consta de dos pasos. En el primer paso se sintetiza una red isotérmica, minimizando el consumo de agua, considerando reúso de agua entre las operaciones. Para ello, se utilizó un modelo de PNL desarrollado por Cortés-Monroy [6], el cual también se resolvió con el algoritmo de la Fig. 2; obteniendo el diseño de red que se muestra en la Fig. 4.

En el segundo paso, la topología del diseño isotérmico de red de la Fig. 4 se expande heurísticamente con base en una estrategia de autocalentamiento [7], como se muestra en la Fig. 5. Con base en la superestructura de la Fig. 5, se desarrolla el modelo P2 de PNL, extendiendo la función objetivo como se muestra en la Ec. (2) e incluyendo en las restricciones los balances de materia para el agua y los contaminantes y los balances de energía en torno a las operaciones usuarias de agua, los calentadores, recuperadores enfriadores y nodos de mezcla y división, respectivamente. El modelo P2 se resolvió, obteniendo el diseño de red que se muestra en la Fig. 6, el cual presenta un

CTA = 932,341.33 \$/año, consumiendo en total 26.535 kg/s de agua dulce, 1,114.47 kW y 0 kW de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, respectivamente. Esto es posible gracias a que en total se recuperan 6,985.38 kW en la red; lo que representa una reducción del 38.37%, 88.47% y 100% en el consumo de agua dulce, de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, respectivamente, en relación con el diseño de red de referencia de la Fig. 3. Reduciendo el CTA en un 83.77% con respecto al CTA del diseño de red de referencia sin reúso de agua ni recuperación de calor.

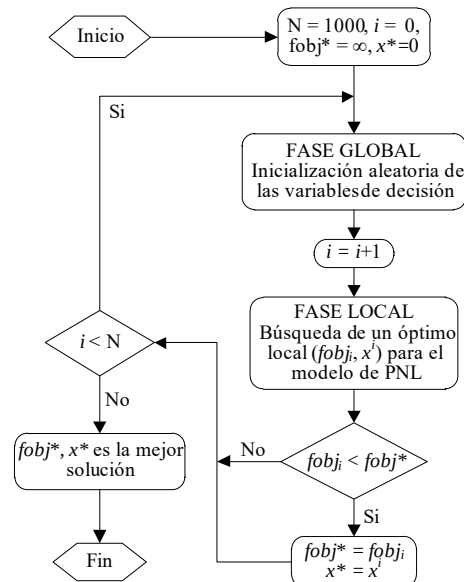


FIGURA 2. Algoritmo de multi-arranque estocástico [4].

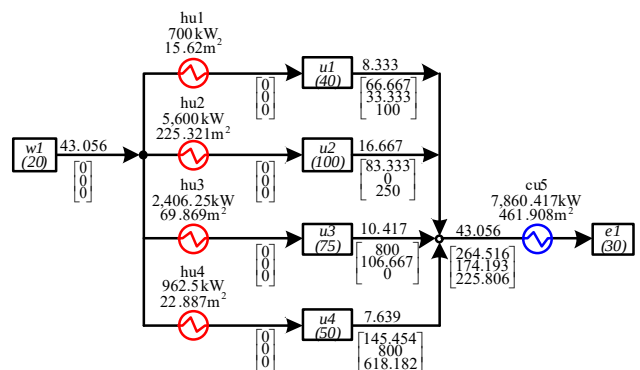


FIGURA 3. Diseño de red de referencia para el Caso de Estudio 1w4u3j, sin reúso de agua ni recuperación de calor, con un CTA = 5,743,767.15 \$/año. Los flujos máscicos de agua se muestran en fuente normal en kg/s, las concentraciones de contaminantes se presentan entre corchetes cuadrados en ppm y las temperaturas se dan entre paréntesis en °C.

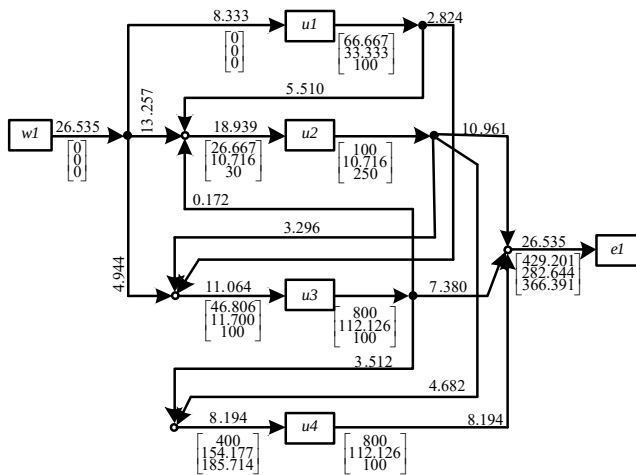


FIGURA 4. Diseño óptimo de una red isotérmica, con un consumo mínimo de agua dulce de 26.535 kg/s. Los flujos máxicos de agua se muestran en fuente normal en kg/s y las concentraciones de contaminantes entre corchetes cuadrados en ppm.

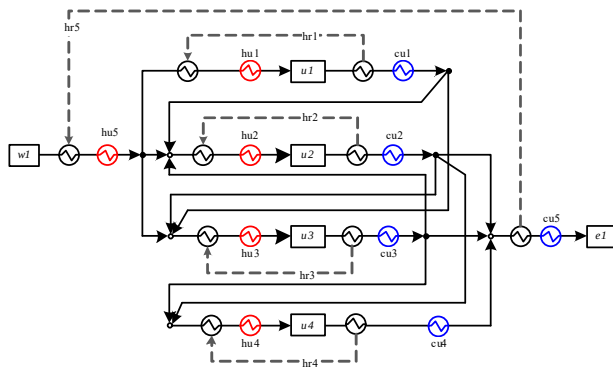


FIGURA 5. Superestructura con integración térmica. Segunda etapa del enfoque secuencial.

Modelo P2

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & H \cdot C_{wl} \cdot f_{wl} \\ & + \sum_{hu=1}^5 OC_{hu} \cdot q_{hu} + \sum_{cu=1}^5 OC_{cu} \cdot q_{cu} \\ & + \sum_{hr=1}^5 (8000 + 1200 \cdot A_{hr}^{0.6}) \\ & + \sum_{hu=1}^5 (8000 + 1200 \cdot A_{hu}^{0.6}) + \sum_{cu=1}^5 (8000 + 1200 \cdot A_{cu}^{0.6}) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde los sub-índices hu , hr y cu identifican a los calentadores, recuperadores de calor y enfriadores, respectivamente.

2.3. Enfoque simultáneo de diseño

El enfoque simultáneo de diseño consta de una sola etapa, en la que se desarrolla una superestructura como la que se muestra en la Fig. 7 [8], la cual considera muchas posibilidades de reúso de agua y de recuperación de calor. Asociado a la superestructura se desarrolla un modelo de PNL, cuya función objetivo, similar a la Ec. (2), minimiza el CTA de la red, determinando un diseño óptimo de red en el que se considera el reúso de agua y la recuperación de calor de forma simultánea. El modelo se resuelve utilizando el algoritmo de solución de la Fig. 2, obteniendo como resultado el diseño de red de la Fig. 8.

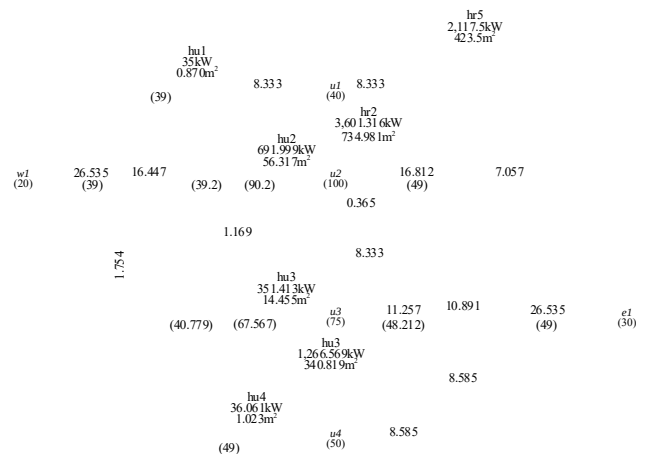


FIGURA 6. Diseño óptimo de red obtenido con el enfoque secuencial de síntesis, con un CTA = 932,341.33 \$/año. Los flujos máxicos de agua se muestran en fuente normal en kg/s y las temperaturas se muestran entre paréntesis en °C.

El diseño de red que se muestra en la Fig. 8, presenta un CTA = 884,564.49 \$/año, consumiendo la misma cantidad de agua dulce y de servicios auxiliares que el diseño de red de la Fig. 6. Sin embargo, el diseño de la Fig. 8 recupera 6,657.675 kW, 4.69% menos con respecto al diseño de red de la Fig. 6, que utiliza tres recuperadores. Esto permite reducir los costos de capital y, por lo tanto, reducir el CTA de la red respecto al diseño de red de la Fig. 6 en un 5.12%. El CTA de la red de la Fig. 8 es 84.60% menor con respecto al CTA del diseño de red de referencia de la Fig. 3.

3. RESULTADOS

En la Tabla 3 se presentan y comparan las características principales de los diseños de red de las Figs. 3, 6 y 8, respectivamente, así como las características principales de diferentes diseños de red reportados en la literatura [2, 8-12] para el Caso de Estudio 1w4u3j, los cuales fueron obtenidos mediante diferentes metodologías secuenciales y simultáneas de diseño. Los resultados publicados en [2, 8-

12], incluidos en la Tabla 3 se verificaron en un trabajo previo [13].

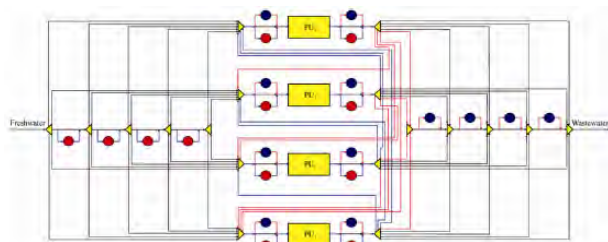


FIGURA 7. Ejemplo de una superestructura para la síntesis simultánea de una red usuaria de agua con integración térmica [8].

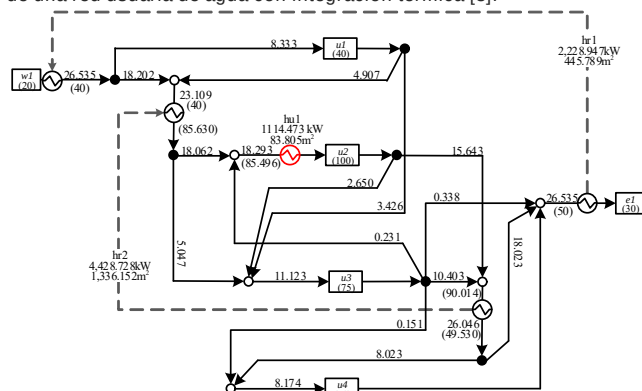


FIGURA 8. Diseño óptimo de red obtenido con el enfoque simultáneo de síntesis, con un CTA = 884,564.49 \$/año. Los flujos máxicos de agua se muestran en fuente normal en kg/s y las temperaturas se muestran entre paréntesis en °C.

TABLA 3. Comparativa de los diseños de red obtenidos en este trabajo y los diseños de red reportados en la literatura para el Caso de Estudio 1w4u3j.

Autor	Consumo		Calor rec. (kW)	Área tot. (m ²)	Costo de cap. (\$/año)	CTA (\$/año)
	w1 (kg/s)	hu (kW)				
Fig. 3	43.056	7,860.41	0	795.61	148,029.7	5,743,767.2
Fig. 6	26.535	1,114.47	6,985.38	1,571.96	225,605.8	932,341.3
Ref. [9]	26.535	1,114.47	6,657.68	1,618.14	199,976.1	906,711.6
Ref. [8]	26.535	1,114.47	6,657.68	1,586.43	190,872.6	897,608.1
Ref. [10]	26.535	1,114.47	6,678.99	1,384.13	183,017.9	889,753.4
Ref. [11]	26.716	1,122.06	6,679.18	1,392.03	183,106.3	894,654.2
Ref. [12]	26.535	1,114.47	6,657.68	1,865.77	177,829.9	884,565.4
Ref. [2]	26.535	1,114.47	6,657.68	1,865.77	177,829.9	884,565.4
Fig. 8	26.535	1,114.47	6,657.67	1,865.75	177,829.0	884,564.5

De la Tabla 3 se puede observar que el diseño de red de referencia de la Fig. 3 es el diseño más costoso, debido principalmente a los costos de operación asociados al consumo de agua y de servicios auxiliares de 5,595,737.5 \$/año, el cual representa el 97.42% del CTA de la red. De ahí la importancia de considerar el reúso de agua y la

recuperación de calor. Al considerar el diseño de este tipo de sistemas mediante un enfoque secuencial, considerando primero esquemas de reúso de agua (Fig. 4) y después esquemas de recuperación de calor (Fig. 5) para obtener el diseño de red de la Fig. 6, se puede obtener un ahorro en los costos de operación del 87.37% con respecto a los costos de operación del diseño de red de la Fig. 3. Con el enfoque secuencial se logra recuperar 6,985.38 kW de energía térmica, la cual se evitó desechar o remover mediante el consumo de servicios auxiliares de enfriamiento, como se hace en el diseño de red de la Fig. 3. Finalmente, si se considera implementar simultáneamente esquemas de reúso de agua y de recuperación de calor, como se formula en la superestructura de la Fig. 7, se pueden obtener diseños de red como el de la Fig. 8 y como en las Refs. [2, 8-12], en donde se puede lograr una reducción en los costos de operación de hasta un 87.37%, con respecto a los costos de operación del diseño de red de referencia de la Fig. 3. Además, en el enfoque simultáneo de diseño se puede obtener una reducción adicional en los costos de capital, debido a que es posible reducir el número de calentadores y recuperadores de calor, redistribuyendo y aumentando el área de intercambio de calor en un número menor de equipos, logrando una mejor integración térmica. Por ejemplo, mientras que el diseño de red de la Fig. 6 utiliza cuatro calentadores y tres recuperadores de calor, con un área total de intercambio de calor de 1,571.96 m², en el diseño de red de la Fig. 8 solo se utiliza un calentador y dos recuperadores de calor, con un área total de intercambio de calor de 1,865.75 m². Es interesante notar que en todos los diseños de red en los que se considera la recuperación de energía, a excepción de la ref. [11], el consumo de servicios auxiliares de calentamiento es de 1,114.47 kW. Esto podría indicar que esta es la cantidad de energía mínima a ser suministrada mediante los servicios auxiliares de calentamiento para cubrir la demanda energética de todas las operaciones usuarias de agua, en particular, la de la operación u2.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se comparan los enfoques secuencial y simultáneo de síntesis para el diseño de redes usuarias de agua con integración térmica con su aplicación al Caso de Estudio 1w4u3j, contrastando los diseños de red obtenidos con ambos enfoques, así como con diferentes diseños de red reportados en la literatura, con referencia a un diseño que no considera reúso de agua ni recuperación de calor (Fig. 3). Se muestra que el enfoque secuencial permite obtener un diseño de red (Fig. 6) que logra reducir hasta en un 38.37%, 85.82% y 100% el consumo de agua, de servicios auxiliares de calentamiento y de enfriamiento, respectivamente; logrando



un ahorro de hasta el 83.77% en el CTA de la red. Mientras que con el enfoque simultáneo se obtuvo un diseño de red (Fig. 8) con la misma reducción en los costos de operación, pero con una reducción adicional en los costos de capital del 21.18%, con respecto al costo de inversión del diseño de red obtenido con el enfoque secuencial de diseño (Fig. 6) y una reducción en el CTA de la red de un 84.60% con respecto al CTA del diseño de red de referencia de la Fig. 3. Por otra parte, es interesante destacar que, en los diseños de red reportados en la literatura y los diseños de red obtenidos en este trabajo, el consumo mínimo de servicios auxiliares de calentamiento requerido para cubrir la demanda total de energía en el sistema es de 1,114.47 kW.

5. CONCLUSIONES

Se comparan las ventajas y desventajas de los enfoques secuencial y simultáneo en la síntesis de redes usuarias de agua con integración térmica, mediante su aplicación a un caso de estudio reportado en la literatura. El enfoque secuencial de síntesis permite reducir considerablemente los costos de operación. Mientras que, el enfoque simultáneo de síntesis puede reducir en igual medida los costos de operación y adicionalmente, permite reducir los costos de capital, reduciendo el número de equipos de intercambio de calor y el CTA. En conclusión, el enfoque simultáneo destacó al permitir encontrar el balance adecuado para reducir los costos de operación y capital simultáneamente, permitiendo obtener un diseño con el menor CTA reportado.

REFERENCIAS

- [1]. Ahmetovic E, Ibric N, Kravanja Z and Grossmann IE, *Water and energy integration: A comprehensive literature review of non-isothermal water network synthesis*. Computers and Chemical Engineering 82:144–171 (2015). 10.1016/j.compchemeng.2015.06.011.
- [2]. Ibric N, Ahmetovic E, Nemet A, Kravanja Z and Grossmann IE. Synthesis of heat-integrated water networks using a modified heat exchanger network superstructure. Energies 15:3158 (2022). 10.3390/en15093158.
- [3]. Chen JJJ, *Logarithmic mean: Chen's approximation or explicit solution?* Computers and Chemical Engineering 120:1–3 (2019). 10.1002/j.compchemeng.2018.10.002.
- [4]. Núñez-Serna and Zamora, *NLP model and stochastic multi-start optimization approach for heat exchanger networks*, Applied Thermal Engineering 94:458–471 (2016). 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.128.
- [5]. Drud AS, *CONOPT – a large-scale GRG code*. ORSA journal on Computing 6:207–216 (1994). 10.1287/ijoc.6.2.207.
- [6]. Cortés-Monroy HT, *Síntesis óptima de redes de uso de agua con operaciones multi-contaminantes*, Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. Julio de 2020.
- [7]. Zhao HP, Yang Y and Liu ZY, *Design of heat integrated water networks with multiple contaminants*, Journal of Cleaner Production 211:530–536 (2019). 10.1016/j.jclepro.2018.11.210.
- [8]. Ahmetovic E and Kravanja Z, *Simultaneous synthesis of process water and heat exchanger networks*, Energy 57:236–250 (2013). 10.1016/j.energy.2013.02.061.
- [9]. Bogataj M and Bagajewicz M, *Synthesis of non-isothermal heat integrated water networks in chemical process*, Computers and Chemical Engineering 32:3130–3142 (2008). 10.1016/j.compchemeng.2008.05.006.
- [10]. Ahmetovic E and Kravanja Z, *Simultaneous optimization of heat-integrated water networks involving process-to-process streams for heat integration*, Applied Thermal Engineering 62:302–317 (2014). 10.1016/j.applthermaleng.2013.06.010.
- [11]. Yan F, Wu H, Li W and Zhang J, *Simultaneous optimization of heat-integrated water networks by a nonlinear program*, Chemical Engineering Science 140:76–89 (2016). 10.1016/j.ces.2015.09.036.
- [12]. Ibric N, Ahmetovic E and Kravanja Z, *Mathematical programming synthesis of non-isothermal water networks by using a compact/reduced superstructure and an MINLP model*, Clean Technologies and Environmental Policy 18:1779–1813 (2016). 10.1007/s10098-016-1152-9.
- [13]. HT Cortés-Monroy, MG Hidalgo-Muñoz y JM Zamora-Mata, *El problema de síntesis de redes no isotérmicas de operaciones usuarias de agua con múltiples contaminantes. Análisis de soluciones a un caso de estudio 1w4u3j*. En Proc. XLIV Congreso Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química, 2023, pp PRO120 – PRO125.





Análisis del impacto de la distribución de temperaturas en el procesamiento hidrotérmico de biomasa utilizando energía solar concentrada

ARGELIA ORTEGA BALBUENA¹, HEIDI ISABEL VILLAFÁN VIDALES^{1,*}, LEOPOLDO MARTÍNEZ MANUEL¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, 62588, México

Autor de Correspondencia: Heidi Isabel Villafán Vidales (e-mail: hivv@ier.unam.mx).

Este trabajo fue financiado por PAPIIT-DGAPA-UNAM bajo el convenio IN107923.

RESUMEN Este trabajo analiza la distribución de temperaturas en un reactor solar hidrotérmico con y sin rotación utilizando termografía infrarroja. El estudio se llevó a cabo en el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del IER-UNAM en donde se utilizó un reactor cilíndrico de 102 ml de capacidad y 60 cm de diámetro externo y una cámara termográfica FLIR T300. La medición de temperaturas se realizó en 3 secciones frontales y traseras, para obtener un total de 6 imágenes utilizando un espacio temporal de 10 minutos entre cada imagen. Los estudios termográficos se complementaron con simulaciones térmicas que permiten obtener las temperaturas externas e internas del reactor. Además se realizaron experimentos de licuefacción hidrotérmica para evaluar experimentalmente el impacto de los gradientes térmicos en los principales productos.

PALABRAS CLAVE: Escriba tres a cinco palabras que sean claves para cualquier persona encuentre su trabajo, separadas por comas.

1. INTRODUCCIÓN

Las diferentes rutas termoquímicas para transformar la biomasa en combustibles son opciones atractivas para reducir la dependencia hacia los combustibles fósiles, aportando beneficios económicos y ambientales. Dentro de las diferentes rutas se encuentra la licuefacción hidrotérmica. Este proceso se utiliza para biomásas con un alto porcentaje

de humedad y se realiza en un intervalo de operación de 200-350 °C y 50-200 bar. Estudios previos (Gasafi et al. 2008) indican que uno de los grandes inconvenientes de la licuefacción hidrotérmica son los altos costos de operación en la etapa de calentamiento, los cuales representan alrededor del 22% de los costos totales de operación de una planta. Para mitigar lo anterior, varios grupos de investigación han propuesto reactores capaces de operar con energía solar concentrada en condiciones subcríticas (Ayala-Cortés et al. 2022, Poravou et al. 2022, Ischia et al. 2020). Este tipo de reactores normalmente consisten en receptores cilíndricos de paredes gruesas ya que deben soportar altas presiones y temperaturas. Sin embargo, al colocarlos en el foco de un sistema de concentración puntual sólo una zona del reactor es irradiada directamente con energía solar concentrada. Esta forma de calentamiento, junto con el espesor de pared, promueven un calentamiento no homogéneo con altos gradientes térmicos en el reactor que reducen su vida útil (Venkataraman et al. 2019) e impactan en los rendimientos de los diferentes productos, ya que la cinética de la reacción depende de la temperatura y la composición de la biomasa (Obeid et al. 2022). Por todo lo anterior es importante conocer de manera detallada la distribución de temperaturas en este tipo de reactores solares con el fin de proponer estrategias de homogeneización de temperaturas. En este sentido este trabajo realiza un estudio de la distribución de temperaturas utilizando termopares, así como por termografía en un prototipo de reactor solar de licuefacción hidrotérmica. La medición con termopares en la cara directamente irradiada muestran que el sistema



alcanza temperaturas exteriores de 250 °C a los 15 minutos de exposición, además de que hay una simetría en las temperaturas en las zonas de medición, y que estas temperaturas dependen de la posición de los termopares y la zona focal. Respecto a la termografía, se encontró que la pared frontal tiene una mayor temperatura, y es particularmente diferente en la zona donde incide la energía solar concentrada, mientras que la pared trasera tiene temperaturas menores con diferencias de temperaturas menores a 30 °C. Esta investigación proporciona avances en la comprensión fundamental de la dinámica de la temperatura en reactores solares hidrotérmicos y proporciona información simple de adquirir, pero valiosa, que permite optimizar su funcionamiento.

2. METODOLOGÍA

Los experimentos se llevaron a cabo con un prototipo de reactor solar hidrotérmico de 104 ml de capacidad, el cual fue diseñado para operar a temperaturas menores a 500 °C y presiones de hasta 220 bar. La pared exterior del reactor fue recubierta con pintura selectiva Solkote Hi/Sorb, que tiene una emisividad de 0.95.

En los experimentos el reactor se colocó en la zona focal del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del Instituto de Energías Renovables, UNAM (Temixco, México). Este horno tiene una potencia de 25 kWt, 18,000 kW/m² de flujo solar pico y un spot solar de 8-9 cm de diámetro, sin embargo para las pruebas se utilizó una apertura del 20 %, es decir un flujo solar promedio de 249 kW/m².

La medición de temperatura se realizó utilizando una cámara termográfica FLIR T300 con un intervalo de medición de 0.7 y 1.3 m, de -20 a 120 °C o de 0 a 350 °C con una resolución de 0.2 °C. Para tener una mejor medición de temperaturas, el reactor se dividió en 3 secciones, tanto la parte frontal como la parte trasera (Fig. 1).

Se realizaron 6 mediciones cada 10 minutos en cada una de las zonas asegurándose que la temperatura inicial fuera la misma.

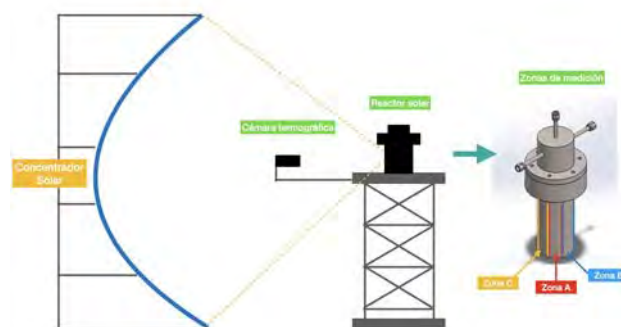


FIGURA 1. Esquema del sistema experimental y zonas de medición en la pared del reactor solar.

Una vez obtenidas las imágenes se analizaron con el software ResearchIR 4 (Fig. 2). La distribución de temperaturas se obtiene en dos momentos importantes: a) al inicio del experimento (0 min), y b) después de 60 minutos (al final del experimento) (Figura 2a). Además en cada zona se colocan dos indicadores o ROIs (Región de Interés) que dan directamente el valor de la temperatura de la pared del reactor. Estos indicadores se denominaron como L1 y L2 y se ubican de la siguiente manera: L1 a 2 cm de la base del reactor y L2 a 4 cm de la base del reactor (Fig. 2b).

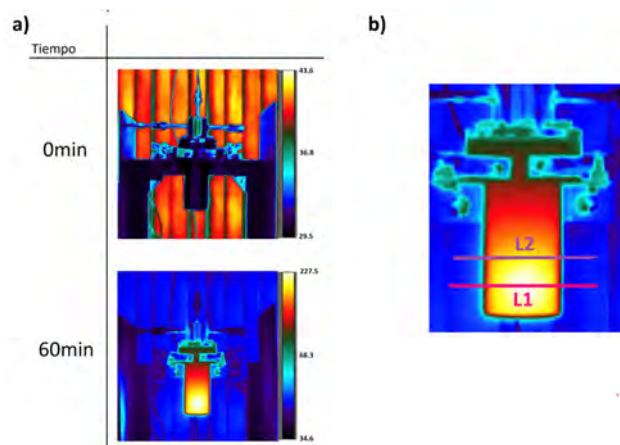


FIGURA 2. Imágenes obtenidas para la zona A, al inicio (0 min) y final de cada medición (1 hora). b) Acercamiento de la imagen termográfica donde se muestran los ROIs L1 y L2.

Al momento de analizar los datos es importante tomar en cuenta la irradiancia directa (DNI, por sus siglas en inglés), ya que las mediciones se llevaron a cabo en días diferentes. El reactor solar es un sistema dinámico, y las temperaturas que se alcanzan dependen de la DNI, por lo tanto fue

necesario realizar una normalización con el fin de obtener valores de temperatura equivalentes para cada experimento. Para lograr esta normalización se utilizan las siguientes relaciones:

$$f = G_b / G_m \quad (1)$$

$$T_f = f T_m \quad (2)$$

donde G_b es la irradiancia directa contra la cual se van a comparar, G_m es la irradiancia de un día diferente o diferente hora. Si los días y factores climatológicos son similares, la radiación será similar entonces el factor de normalización f será casi uno. T_f es la temperatura final, T_m es la temperatura medida con la cámara termográfica.

3. RESULTADOS

La figura 3 muestra la distribución de temperaturas en la cara frontal en L1 y L2, en diferentes momentos. Se observa que hay un aumento gradual de la temperatura máxima en ambas posiciones a lo largo del tiempo. A los 10 minutos de calentamiento, en el indicador L1, la pared frontal del reactor tiene una temperatura máxima de 170 °C justo en la zona de mayor concentración solar (spot solar), mientras que las zonas más alejadas tienen una temperatura de 140 °C. Esta diferencia de temperaturas va incrementando conforme pasa el tiempo y se va calentando el reactor. A los 60 minutos, la diferencia de temperaturas entre la zona de mayor concentración y las orillas de la pared frontal alcanza los 60 °C. Además, como era de esperar, el punto de medición ubicado en el centro del spot (L1) registra temperaturas más altas en comparación con el punto más alejado (L2). Sin embargo, esta disparidad es más evidente en el centro del reactor que en sus extremos.

En el caso de la medición en el indicador L2, las diferencias de temperaturas no son tan significativas, alrededor de los 30 °C. En esta zona de medición los perfiles de temperatura tienden a aplanarse con el tiempo, fenómeno atribuible a la difusión térmica.

La Figura 4 presenta los resultados correspondientes a la parte posterior del reactor en los dos indicadores L1 y L2. Se destaca que, a diferencia de la cara frontal, las disparidades de temperatura entre los extremos y el centro son menos pronunciadas, con diferencias de aproximadamente 20 °C. Este hallazgo sugiere una distribución térmica más homogénea en la parte trasera del reactor en contraste con la parte frontal, donde la variabilidad de temperatura es considerablemente mayor. Lo anterior se debe a que esta zona del reactor se transfiere, principalmente, por

conducción, mientras que en la cara frontal se calienta por radiación.

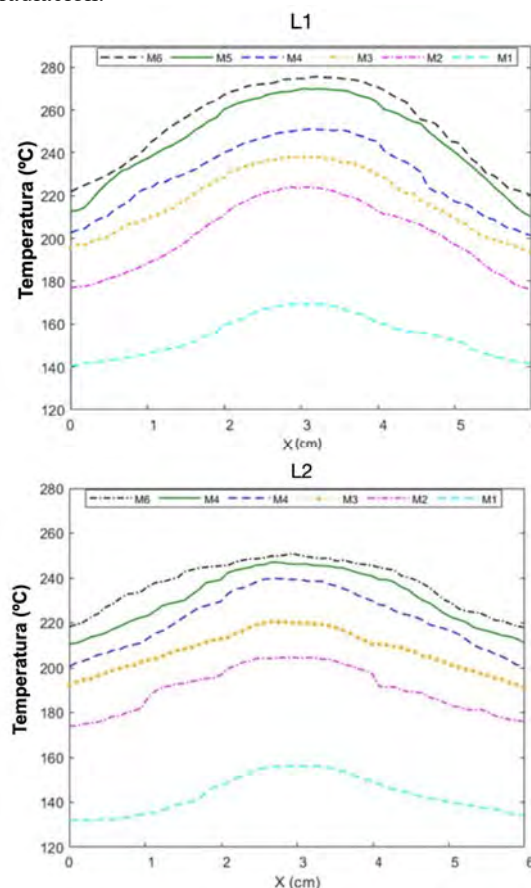


FIGURA 3. Distribución de temperatura en la cara frontal del reactor, en L1 y L2, para diferentes tiempos de medición: M1= 10 min, M2=20 min, M3=30 min, M4= 40 min, M5=50 min y M6=60 min.

La Figura 5 muestra el perfil de temperaturas del reactor en todo el diámetro del reactor a los 30 minutos de calentamiento. Como se puede observar la zona frontal donde incide la energía solar concentrada es la que alcanza la mayor temperatura, mientras que la cara trasera es la que tiene una menor temperatura. La diferencia que hay entre las dos caras (frontal y trasera) está entre los 60 y 70 °C.

3.2. Impacto de la distribución de temperaturas

El proceso de licuefacción hidrotérmica es un proceso complejo que involucra varias reacciones, además los rendimientos a los diferentes productos depende principalmente de la composición de la biomasa, y de parámetros de operación como, la temperatura y tiempo de reacción.

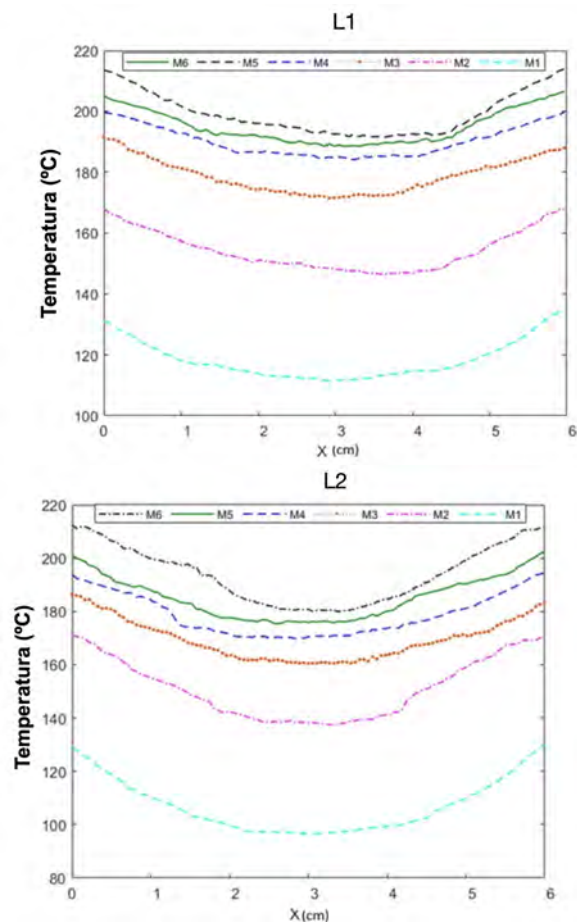


FIGURA 4. Distribución de temperatura en la cara trasera del reactor, en L1 y L2, para diferentes tiempos de medición: M1= 10 min, M2=20 min, M3=30 min, M4= 40 min, M5=50 min y M6=60 min.

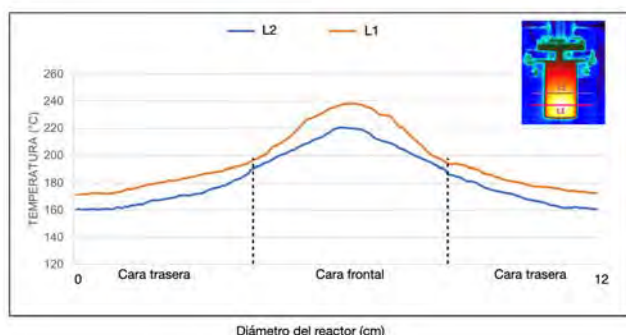


FIGURA 5. Distribución de temperatura en todo el diámetro del reactor en las posiciones señaladas por los indicadores L1 y L2, para un tiempo de medición: M3=30 min.

De acuerdo a estudios cinéticos reportados por Obeid et al. 2022, la licuefacción hidrotérmica de biomasa

lignocelulósica se lleva a cabo desde los 250 °C hasta los 350 °C y el mecanismo cinético propuesto por estos mismos autores tiene 17 rutas diferentes que dependen de cada componente de la biomasa, i.e. Carbohidratos, lípidos, proteína y lignina, la temperatura y tiempo de reacción. En este sentido, de acuerdo a estudios teóricos hechos para madera de pino se observa que a 250 °C y 15 minutos de tiempo de reacción (Naravez-Saucedo et al.2022), se tiene un rendimiento de biocrudo es de aproximadamente el 10 %, mientras que el de biocarbón es de 52%, el gas de 8% y la fase acuosa de 30%. Si se aumenta la temperatura del reactor 50 °C, es decir, ahora se tiene 300 °C, y con el mismo tiempo de reacción, entonces el rendimiento a cada uno de los productos es el siguiente: Biocrudo: 30%, biocarbón 40%, gas 15% y fase acuosa de 15%. Como se puede observar, el rendimiento a cada uno de los componentes se ve altamente afectado por diferencias de temperaturas de 50 °C, por ejemplo el biocrudo paso de 10% (250 °C) a casi 30% (300 °C), mientras que el de biocarbón bajó de 52 % (250 °C) a 40 % a 300 °C. En conclusión, el proceso hidrotérmico depende fuertemente de la temperatura, y cambios mayores a 50 °C tienen un impacto fuerte en los rendimientos de cada uno de los principales productos. En el caso del reactor hidrotérmico analizado en este trabajo, se tienen diferencias de temperaturas de aproximadamente 70 °C; por lo tanto, es necesario proponer estrategias que permitan tener temperaturas más homogéneas, con diferencias de temperaturas menores a 50 °C, que permitan tener un menor impacto en los productos y en la vida útil del reactor.

TABLA 1. Unidades

Symbo l	Description	Value
Φ	Variable 1	0.017 kg
B	Variable 2	2.6146 s
H	Variable 3	0.672 m
m	Variable 4	1.6949 l
M	Variable 5	0.224 cm ²
$4\pi M$	Variable 6	1.7376 w
σ	Variable 7	0.017 Ω
j	Variable 8	2.6146 mm
J	Variable 9	0.672 g

5.2. Multifiguras

Cuando una figura esté formada por varias gráficas o figuras, éstas deben unirse antes de colocarlas en este format. Todas deben ser perfectamente legibles y bien identificadas.



6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la distribución de temperaturas en la cara frontal y posterior del reactor revelan patrones significativos en el comportamiento térmico del sistema. En la cara frontal, se observa un aumento gradual de la temperatura máxima a lo largo del tiempo, con una disparidad notable entre el punto de medición central y el más alejado, fenómeno que tiende a aplanarse ligeramente con el transcurso del tiempo debido a la difusión térmica. Por otro lado, en la parte posterior del reactor, las diferencias de temperatura entre los extremos y el centro son menos marcadas, indicando una distribución térmica más homogénea en esta región. Sin embargo, al obtener la distribución de temperaturas en todo el diámetro del reactor se observa que las diferencias de temperaturas entre la cara frontal y trasera alcanzan los 70 °C a los 30 minutos de calentamiento. Estas diferencias de temperaturas son significativas y pueden tener un fuerte impacto en los rendimientos a productos y la vida útil del reactor, ya que generan puntos de estrés térmico que se acentúan con las altas presiones, por lo tanto, es importante proponer estrategias de homogeneización de temperatura que permitan optimizar su rendimiento

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico del Ing. Quiñones Aguilar. A. Balbuena agradece el apoyo otorgado por CONAHCYT dentro del programa “Investigadores por México”.

REFERENCIAS

Artículos

- [1]. Gasafi E., Reinecke M.Y., Kruse A., Schebek L., *Economic analysis of sewage sludge gasification in supercritical water for hydrogen production*. Biomass Bioenergy 32: 1085-1096 (2008) 10.1016/j.biombioe.2008.02.021.
- [2]. Venkataraman M.B, Asselineau C.A., Rahbari A., and Pye J., *Modelling of a 50 MWth on-sun reactor for SCWG of algae: Understanding the design constraints*. AIP Conf. Proc. 2126-1: 180017 (2019). 10.1063/1.5117697.
- [3]. Ayala-Cortés A., Arcelus-Arrillaga P., Millan M., Okoye P.U., Arancibia-Bulnes C.A., Pacheco-Catalán D., Villafán-Vidales H.I, *Solar hydrothermal processing of agave bagasse: Insights on the effect of operational parameters*. Renewable Energy 192:14-23(2022). 10.1016/j.renene.2022.04.059.
- [4]. Poravou, C.A., Tsongidis, N.I., Lekkos, C. et al. *Valorization of Plastic Waste: A Lab-Scale Approach with the Aid of Solar Hydrothermal Liquefaction Technology*. Waste Biomass Valorization 13: 3835–3844 (2022) .10.1007/s12649-022-01837-3.
- [5]. Ischia, G., Orlandi, M., Fendrich, M.A., Bettonte, M., Merzari, F., Miotello, A., Fiori, L. (2020) *Realization of a solar hydrothermal carbonization reactor: A zero-energy technology for waste biomass valorization*. Journal of Environmental Management, 259:110067 (2020). 10.1016/j.jenvman.2020.110067.
- [6]. Obeid, R., Smith, N., Lewis, D.M., Hall, T., van Eyk, P., *A kinetic model for the hydrothermal liquefaction of microalgae, sewage sludge and pine wood with product characterisation of renewable crude*. Chemical Engineering Journal, 428: 131228 (2022). 10.1016/j.cej.2021.131228.
- [7]. Narvaez Saucedo M.E, Arancibia-Bulnes C.A, Macias J.D., Ramirez-Cabrera M.A., Valades-Pelayo P.J. *Heat transfer and chemical kinetics analysis of a novel solar reactor for hydrothermal processing*, Solar Energy, 241: 372-385 (2022).





Heidi Isabel Villafán Vidales es investigadora titular A del Instituto de Energías Renovables-UNAM (IER- UNAM). Es Ingeniera Química por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y doctora en Ingeniería en Energía por la UNAM. Del 2009 al 2011 fue investigadora postdoctoral en dos instituciones: Procédés, Matériaux et Énergie Solaire del Centre National de la Recherche Scientifique (PROMES-CNRS, Francia) y la Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa. Desde el 2024 es investigadora Nivel II del Sistema Nacional de Investigadores. Sus líneas de

investigación son: reactores solares, procesos termoquímicos solares y concentración solar.



Argelia Balbuena Ortega es doctora en Física Aplicada por la BUAP, con especialización en óptica. Realizó una estancia postdoctoral en el Instituto de Física de la UNAM, enfocada en la manipulación de luz con luz mediante materiales no lineales. Actualmente forma parte del programa “Investigadores por México” en el Instituto de Energías Renovables, donde desarrolla investigación multidisciplinaria en dinámica de gotas, interacción luz-materia y procesos de transferencia de calor. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI)

nivel I.





Pirólisis solar de sargazo para la producción de biofertilizante a base de carbón

H.I. VILLAFÁN VIDALES¹, T. GONZALEZ NAVA, E. ANGUERA-ROMERO¹, A. ASPIAZU-MÉNDEZ¹, N. A. CISNEROS-CÁRDENAS², A. LÓPEZ¹, C. ESTRADA-GASCA¹

¹ Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Temixco, Morelos, 62588, México

² Universidad de Sonora, Facultad Interdisciplinaria de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Hermosillo, Sonora, 83000, México.

Autor de Correspondencia: H. I. Villafán Vidales (e-mail: hivv@ier.unam.mx).

RESUMEN Desde el 2014 el Caribe Mexicano ha recibido más de 2360 m³ de Sargassum por km de costa. Casi en su totalidad, el sargazo que llega a la playa se recoge y se acumula sin tratar; las altas temperaturas del Caribe facilitan su rápida descomposición generando contaminación, problemas de uso de las playas y problemas de salud en la población local. En este sentido, este trabajo propone un tren de tratamiento solar para la valorización del Sargazo de las especies *fluitans* III, *Natans* VII y una mezcla de ambos, el cual consiste en el secado solar del sargazo fresco y la pirólisis solar para la producción de carbón. Los principales resultados indican que el tiempo de secado es de 90 minutos independientemente si se usa un secador solar tipo invernadero (GHD) o un secado a cielo abierto. Respecto a la pirólisis, los principales resultados indican que se obtiene un carbón amorfo, con componentes inorgánicos como potasio, sodio, azufre, cloro, el cual puede utilizarse como biofertilizante.

PALABRAS CLAVE: Energía solar concentrada, Reactor solar, biofertilizante, secado solar, reactor auger.

1. INTRODUCCIÓN

El sargazo (*Sargassum* sp) es una macroalga que se mueve por las corrientes oceánicas y forma grandes colonias, su crecimiento excesivo se debe a la combinación de plancton vegetal producido en zonas cálidas y las corrientes marinas que las trasladan a las costas caribeñas. La llegada masiva de sargazo a las costas causa serios problemas ambientales, sanitarios, ecológicos y económicos; y en conjunto con su descomposición por el nulo tratamiento, se producen gases de olor desagradable que afectan directamente al turismo y

a la región marina. Se estima que desde el 2014 llegaron al Caribe Mexicano 2360 m³ de sargazo por km de costa [1]. Para mitigar estos problemas se han propuesto varias alternativas para su uso, entre las: como materia prima para la producción de ligantes asfálticos, paneles de MDF, adobe, concreto [2,3]. También para la extracción de ácido alginico y fucoidan, la producción de biofiltros y bioadsorbentes, entre otros [4]. La mayoría de estos procesos utilizan la biomasa seca, y secar el sargazo es un proceso altamente energético que encarece su uso. En este sentido, este trabajo propone un tren de tratamiento solar para la valorización del sargazo que llega a las costas mexicanas, el cual consiste en el secado solar del sargazo fresco y la pirólisis solar para la producción de carbón utilizando un reactor Auger. Para las pruebas se utilizaron 2 especies de Sargazo: *fluitans* III y *Natans* VII, así como una mezcla [5]. El secado solar se realizó en un secador solar tipo invernadero en donde se determinó el tiempo de secado. Por otro lado, se realizó la pirólisis solar con el fin de obtener biocarbón que pueda ser utilizado como biofertilizante. Los resultados del estudio de secador solar estiman un tiempo de 90 minutos como pretratamiento, independientemente de la tecnología utilizada (invernadero o cielo abierto), sin embargo el uso de un secador solar tipo invernadero disminuye el tiempo de secado hasta 30 minutos. Con respecto a la pirólisis solar, se utilizaron experimentos en un reactor tipo Auger operado a temperaturas en un rango entre 550 y 600 °C, obteniendo rendimientos de biocarbón de 40-50%. El biocarbón tiene características amorfas con componentes inorgánicos como KCl, CaCO₃, NaCl, MgO, CaO lo que indica su posible aplicación como biofertilizante.



2. METODOLOGÍA

2.1. Secado solar

Las muestras de sargazo fresco fueron recolectadas en Puerto Morelos, Quintana Roo, México, para posteriormente ser clasificadas por morfotipos (Figura 1a y 1b). Posteriormente, se hicieron pruebas de secado a cielo abierto y en un secador solar tipo invernadero (GHD) con el fin de comparar los tiempos de secado y determinar la difusividad efectiva. El GHD consta de tres entradas y tres salidas para el flujo de aire. El GHD tiene tres ventiladores colocados en diferentes zonas que favorecen la recirculación del aire y un secado más eficiente (figura 1c) [6].



FIGURA 1. a) Etapa de recolección de sargazo en Puerto Morelos, Quintana Roo. b) Fotografía del *S. fluitans* III. c) Secador solar tipo invernadero (GHD) con vista exterior.

2.3. Caracterización fisicoquímica del *Sargassum*

Una vez seco el *S. fluitans* III y el *S. Natans* VII se realizó una caracterización fisicoquímica utilizando diferentes técnicas. La composición elemental CHNS-O se realizó utilizando un analizador Perkin Elmer PE2400.

El análisis próximo de la muestra se realizó utilizando un TGA (TA, Q500) y sometiendo la muestra a una temperatura de 50 a 900 °C en una atmósfera de nitrógeno. La cantidad de cenizas se determinó siguiendo el método NREL/TP-510-42622. Finalmente se realizó un análisis por difracción de rayos X (DRX) de las cenizas (Rigaku Ultima IV).

2.2. Pirólisis solar

La pirólisis solar de biomasa se realizó en el Horno Solar de Alto Flujo Radiativo del IER-UNAM (HoSIER) utilizando el reactor de pirólisis solarizado tipo Auger del IER UNAM (SARPIER, por su siglas en inglés).

El reactor, de 1.5 m de longitud y fabricado en acero inoxidable 316L, incorpora en su interior un tornillo sin fin que transporta la materia prima desde la zona de menor temperatura, ubicada bajo el sistema de alimentación, hasta la región de mayor temperatura, situada próxima al receptor y sobre el depósito de recolección, tal como se muestra en la figura 2a. Del lado opuesto de este depósito, se localiza el sistema de condensación en el que se separan los líquidos

pirolíticos del gas de síntesis. Al concluir el proceso de pirólisis, el biocarbón producido es descargado al depósito por el movimiento generado por el tornillo.

El suministro de energía térmica se realiza mediante calentamiento indirecto usando un intercambiador de tubos concéntricos. Se trata de dos cilindros, uno que contiene el tornillo sin fin y con aletas en su superficie exterior, y otro concéntrico a éste que conduce aire a alta temperatura para transferir el calor a la pared del mismo. La dirección del movimiento del aire es a contraflujo de la dirección del movimiento de la materia prima. Dicho aire se calienta irradiando un receptor volumétrico, dispuesto frente al reactor, con el flujo solar altamente concentrado por el HoSIER.

Este sistema de calentamiento indirecto aísla el fluido caloportador del gas inerte, que transfiere la energía térmica a la biomasa. En las pruebas reportadas se empleó argón para la generación de una atmósfera no oxidativa.

El método de control de temperatura en el interior del reactor se realiza mediante la variación del flujo radiativo concentrado por el HoSIER, usando un atenuador del tipo persianas verticales. Este atenuador regula la cantidad de radiación solar reflejada por el heliostato hacia el concentrador.

Para el monitoreo y control de las temperaturas durante la experimentación, se instalaron tres termopares distribuidos como se muestra en la Figura 2b.

El termopar T_{Rec} , ubicado en la parte posterior del receptor, indica la temperatura máxima del aire que ingresa al intercambiador de calor. El termopar T_{IntMax} , localizado en el interior del reactor y al final de la carrera del tornillo, monitorea la temperatura máxima del gas inerte que está en contacto con la biomasa. Este valor se utiliza como la temperatura objetivo, una vez alcanzada se inicia el desplazamiento de la materia orgánica. El termopar T_{IntMin} , ubicado en el interior del reactor cerca de la zona de alimentación de biomasa, indica la temperatura mínima registrada durante la experimentación. En la etapa de enfriamiento del reactor, este valor se convierte en el máximo.

2.3. Metodología y diseño experimental de la etapa de pirólisis solar.

El procedimiento experimental para la pirólisis solar de sargazo se estructuró en cuatro etapas principales, que abarcan desde la preparación de la biomasa hasta la recolección del biocarbón obtenido. Este diseño metodológico permitió garantizar condiciones controladas de alimentación, calentamiento y reacción, así como la

generación de un producto sólido apto para su posterior análisis. A continuación, se describen las cuatro etapas.

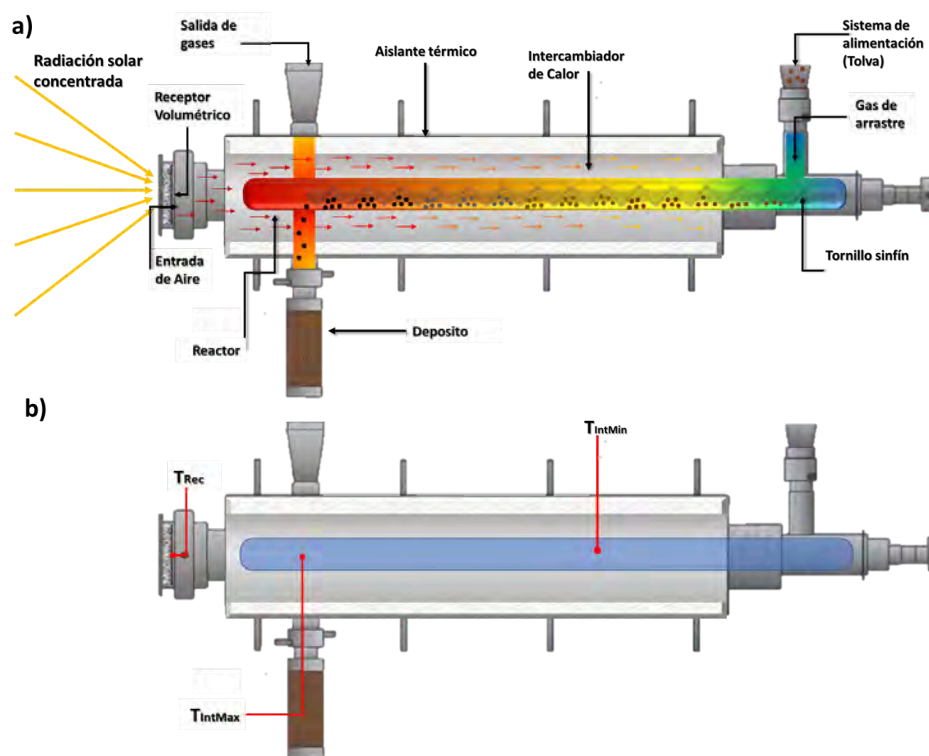


FIGURA 2. Reactor de pirólisis solarizado tipo Auger del IER UNAM. a) Componentes del SARPIER, b) Distribución de termopares en el SARPIER.

Etapas 1. Preparación y carga de la biomasa

Previo a la alimentación del reactor, se trituró el sargazo hasta obtener partículas con un diámetro en el intervalo de 1 a 4 mm. La masa varió para cada experimento según su disponibilidad. Los experimentos realizados se describen en la tabla 1.

TABLA 1. Descripción de los experimentos

Experimento	Biomasa	Masa (g)
A	<i>S. fluitans</i> III	385
B	<i>S. natans</i> VII	165
C	Combinado (<i>S. fluitans</i> III y <i>S. natans</i> VII)	600

La biomasa triturada se introdujo en el sistema en 3 cargas divididas en intervalos de 3 minutos con el tornillo sinfín en operación y bajo un flujo continuo de gas inerte de 1 L·min⁻¹. Posteriormente, el tornillo se mantuvo en

movimiento hasta alcanzar los 30 minutos, con el objetivo de desplazar la biomasa hacia la zona de mayor temperatura del reactor.

Etapas 2. Precalentamiento del sistema

El precalentamiento se llevó a cabo mediante la apertura del atenuador del Horno Solar de Alto Flujo Radiativo (HoSIER), irradiando el receptor durante 30 a 45 minutos dependiendo del recurso solar para el día en cuestión o hasta alcanzar la temperatura objetivo en el interior del reactor (T_{IntMax}) de 550 °C.

Etapas 3. Calentamiento y proceso de pirólisis

Al alcanzar la temperatura objetivo, se activó el transporte de biomasa ajustando la velocidad del tornillo a 0.5 rpm. Bajo estas condiciones, se promovió la reacción de pirólisis según el experimento con duración entre 70 a 125 minutos. Durante el proceso, se alcanzaron temperaturas máximas en T_{IntMax} aproximadamente de 600°C. El flujo de gas inerte se

mantuvo constante en $1.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ para garantizar una atmósfera libre de oxígeno.

Etap 4. Enfriamiento del reactor y recolección del biocarbón

Finalizada la pirólisis, el atenuador del HoSIER se cerró completamente, permitiendo el enfriamiento del sistema. Una vez que la temperatura interna mínima (T_{IntMin}) alcanzó la temperatura ambiental, se procedió a la recolección del biocarbón para su posterior caracterización.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización del *S.fluitans* III y *S.Natans* VII

El análisis último del *S. fluitans* III indica que contiene: 26.83% de carbono, 4.36% de hidrógeno, 1.17% de nitrógeno, 0.92% de azufre y 66.7% de oxígeno (calculado por diferencia). Por otro lado, el *S. natans* VII contiene: 26.38% de carbono, 4.41% de hidrógeno, 1.02% de nitrógeno, 0.64% de azufre y 67.55% de oxígeno.

Para calcular el poder calorífico (HHV) se utilizó la ecuación de H. Seehar et al. [7]:

$$\text{HHV} = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211\text{Ash}$$

El análisis próximo de ambas especies de Sargazo se muestra en la Tabla 2, en donde se puede observar que ambas especies tienen características muy similares.

TABLA 2. Análisis próximo de la macroalga

	<i>S. fluitans</i> III	<i>S. Natans</i> VII
Análisis próximo (%wt, peso seco)		
Humedad	6.9	7.1
Materia volátil	78.45	83.2
Carbón fijo	17.19	15.02
Cenizas	31.84	24.72
HHV (MJ/kg)	7.67	6.94

En análisis TGA (Fig. 3) de ambas especies se pueden observar algunos picos de degradación relevantes muy similares, en donde a partir de 61°C a 200°C se tiene un porcentaje del 14 y 15% en pérdida de masa, debido a la eliminación de agua y algunas sustancias volátiles contenidas en ambas especies de sargazo. A partir de los 221°C a los 580°C ocurre la mayor pérdida de masa, con un porcentaje del 34.9%, lo cual se debe a la degradación de algunos biopolímeros contenidos en estas algas; además de una descarbonización y degradación de polímeros importantes. A partir de los 580°C y hasta los 889°C

ocurre una última parte de degradación, en donde existe una degradación de material orgánico y la eliminación de algunos metales y sales contenidos en la macroalga [8].

3.2. Secado solar

El tiempo de secado fue menor en el GHD para las dos especies de macroalga. Para el *S. fluitans* III fue de 60 y 90 min en las dos condiciones probadas experimentalmente (GHD y secado abierto), y para el *S. natans* VII fue de 90 y 92 min, respectivamente.

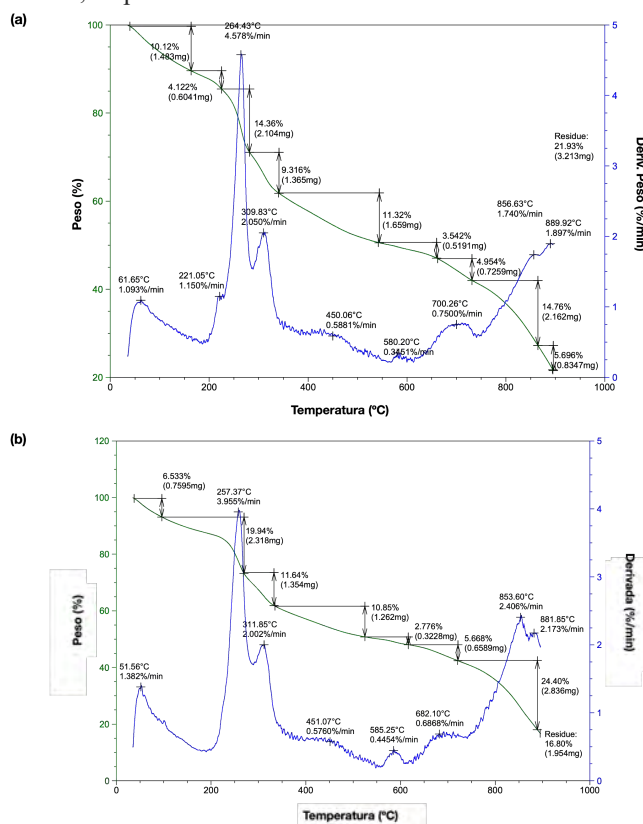


FIGURA 3. Análisis termogravimétrico del a) *S. fluitans* III y b) *S. Natans* VII

Los valores de la difusividad efectiva de ambas especies se encuentran entre el rango reportado para la difusión líquida. Para *S. fluitans* III se obtuvo un valor de $1.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para el secado a cielo abierto y un valor de $1.82 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para el GHD, mientras que para *S. natans* VII se obtuvo un valor de $1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para el secado a cielo abierto y un valor de $1.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para el GHD.



3.2. Pirólisis solar

En la Figura 4 se muestra la evolución de las temperaturas del SARPIER para los tres experimentos y la irradiancia normal directa (DNI, por sus siglas en inglés). En dicha figura se observa que el comportamiento térmico del reactor responde rápidamente a la apertura del atenuador. Con respecto a la temperatura del receptor (línea roja), ésta aumentó desde la temperatura ambiente de $\sim 30^\circ\text{C}$ hasta por encima de los 800°C en un intervalo de 6 a 8 minutos para los tres casos. Durante la operación del horno, el atenuador se mantuvo abierto y se logró estabilizar la temperatura del receptor para los tres experimentos, con promedios de 1003°C , 952°C y 997°C , para T_{RecA} , T_{RecB} y T_{RecC} respectivamente. Las fluctuaciones observadas en la temperatura del receptor se deben a los ajustes en el sistema de seguimiento del heliostato. Aunque la temperatura del receptor es sumamente sensible a estos ajustes, cuando son de corta duración, no se producen cambios significativos en las temperaturas internas del reactor, como se observa en los comportamientos de T_{IntMin} (azul) y T_{IntMax} (verde).

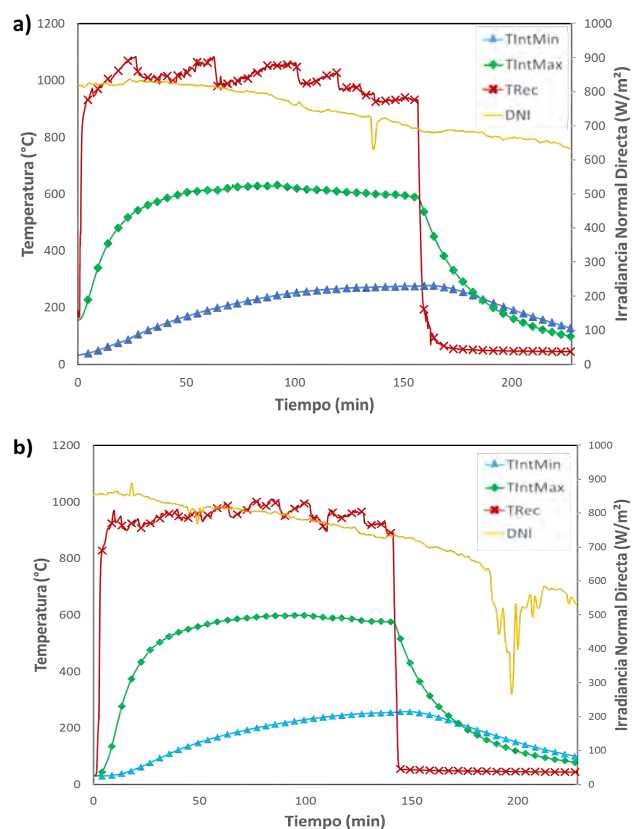
La temperatura objetivo (T_{IntMax}) establecida para los tres casos fue de 550°C . Una vez alcanzada, se activa el movimiento del tornillo y, con ello el desplazamiento de la materia orgánica. La temperatura promedio de los procesos de pirólisis en esta etapa para cada experimento fue de $T_{\text{IntMaxC}} = 607^\circ\text{C} \pm 17$, $T_{\text{IntMaxB}} = 585^\circ\text{C} \pm 12$ y $T_{\text{IntMaxA}} = 574^\circ\text{C} \pm 12$.

La producción de salida de gas de síntesis se registra aproximadamente a $t = 29$ min. En ese instante, las temperaturas de operación para cada experimento fueron 549°C , 570°C y 530°C para T_{IntMaxA} , T_{IntMaxB} y T_{IntMaxC} , respectivamente.

La duración de la etapa de calentamiento y pirólisis fue distinta para cada experimento debido a las condiciones climáticas. Dicha etapa finaliza con el cierre del atenuador, dando paso a la etapa de enfriamiento. Para el experimento A, este proceso inicia cuando $t = 157$ min, con temperaturas al interior del reactor de 275°C y 587°C para T_{IntMinA} y T_{IntMaxA} , en ese orden. Para el experimento B, la etapa de enfriamiento inicia a $t = 141$ min, con temperaturas en el interior del reactor de 255°C y 575°C para T_{IntMinB} y T_{IntMaxB} , respectivamente. Y para el experimento C, el enfriamiento comienza cuando $t = 102$ min, con valores de temperatura de 221°C y 589°C para T_{IntMinC} y T_{IntMaxC} .

Durante la operación del reactor se forma una capa de biocarbón en la superficie interna ubicada debajo del tornillo sinfín. Esta capa está constituida por partículas con

diámetros menores a 0.5 mm. Este valor es inferior al rango de tolerancia del diseño mecánico del tornillo, por lo que impide su desplazamiento completo hacia el depósito de recolección. Como consecuencia, en la etapa de enfriamiento, cuando el tornillo se detiene es posible que continúe el proceso de pirólisis. En esta etapa, los valores máximos registrados de T_{IntMin} oscilaron entre 233°C y 277°C . Dichos valores están reportados en la Tabla 3 y dependen del tiempo de experimentación, así como de las condiciones climatológicas.



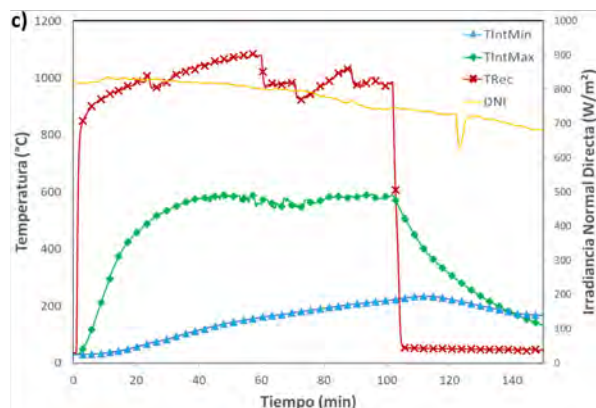


FIGURA 4. Perfil de temperaturas en el SARPIER en relación con la Irradiancia Normal Directa para: a) *S. fluitans* III, b) *S. natans* VII y c) mezcla de sargazos.

TABLA 3. Parámetros experimentales y condiciones operativas de la pirólisis solar en el SARPIER

Exp.	masa (g)	Inicio E3 (min)	Fin E3 (min)	Tiempo E3 (min)	DNI E2-E3 Promedio (W/m2)	T _{IntMax} E3 Promedio (°C)	T _{Rec} E2-E3 Promedio (°C)	T _{IntMin} E4 Máximo (°C)
ExpA	365	29.4	156.7	127.3	783.5	607.4	1001.4	277.1
ExpB	165	44.7	140.9	96.2	803.4	584.6	952.6	258.0
ExpC	600	32.6	101.8	69.2	802.8	573.9	997.0	233.6

3.2. Biocarbón

Con el reactor Auger se obtuvieron rendimientos diferentes (Fig. 5). El menor rendimiento se obtuvo cuando se utilizó *S. fluitans* III obteniendo un 33.6%, mientras que con el *S. natans* VII se obtuvo un rendimiento del 56.6%. Con la mezcla de sargazos se obtuvo un rendimiento de 55.3%. Las diferencias que se observan en estos rendimientos pueden atribuirse a los diferentes tiempos de residencia. En el experimento A (*S. fluitans* III) el tiempo de residencia fue de 127 minutos (Tabla 3), mientras que en el experimento B (*S. natans* VII) fue de 96 minutos (Tabla 3). En el caso de la biomasa combinada el tiempo de residencia fue de 69 minutos (Tabla 3). Un mayor tiempo de residencia favorece las reacciones de craqueo y deshidratación, lo que incrementa la producción de bioaceites y disminuye en rendimiento a biocarbón [9]. Los resultados de la pirólisis solar son comparables con los rendimientos obtenidos por Farobie et al. [9], quienes obtienen rendimientos a biocarbon del 70% con tiempos de residencia de 10 min y al aumentar el tiempo de residencia a 30 y 50 minutos, el rendimiento a carbón disminuye a 48 y 30%, respectivamente.

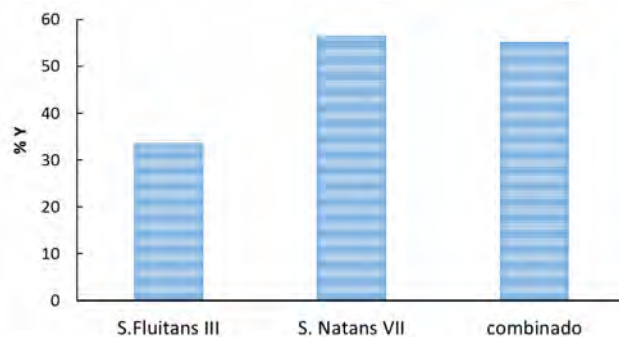


FIGURA 5. Rendimientos a biocarbón de las 3 pirólisis solares.

El análisis próximo de los biocarbones obtenidos por pirólisis solar se muestra en la Tabla 4. Los resultados muestran que el biocarbón proveniente de mezcla de sargazos tiene un mayor contenido de cenizas y materia volátil, el *S. natans* muestra un mayor contenido de humedad y el *S. fluitans* III presenta el pH más alto.

TABLA 4. Análisis próximo de los biocarbones

	<i>S. fluitans</i> III	<i>S. natans</i> VII	Combinado
Humedad	2.5	4.7	2.9
Materia volátil	39.6	45.48	50
Cenizas	44.61	55.18	59

pH 9.36 | 9.21 | 9.33

El estudio termogravimétrico de los 3 tipos de biocarbón obtenido, se muestra en la figura 6; el estudio indica que los biocarbones analizados no son estables a alta temperatura, principalmente a temperaturas superiores a los 500 °C. El mayor porcentaje de pérdida de masa se observa alrededor de los 700 °C, cuyos valores oscilan entre el 16% y el 24%.

El análisis de DRX de los biocarbones obtenidos indica que se encuentran las siguientes fases cristalinas: NaCl, KCl, CaCO₃, CaO, MgO. La presencia de estos componentes inorgánicos en la superficie del biocarbón nos indican que podría aplicarse como biofertilizante.

El análisis SEM de la superficie de una de las muestras de carbones (*S. fluitans* III) se muestra en la figura 7, donde se aprecia que la temperatura del proceso de pirólisis descompone la estructura original del Sargazo (Fig. 7a) obteniendo un material con una morfología desordenada y la presencia de algunos poros (Fig. 7b). En la superficie del material se pueden apreciar zonas blancas y estructuras cúbicas que corresponden a compuestos inorgánicos (Fig. 7c).

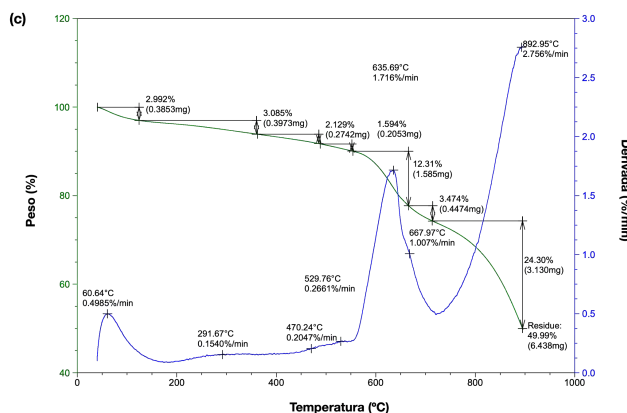
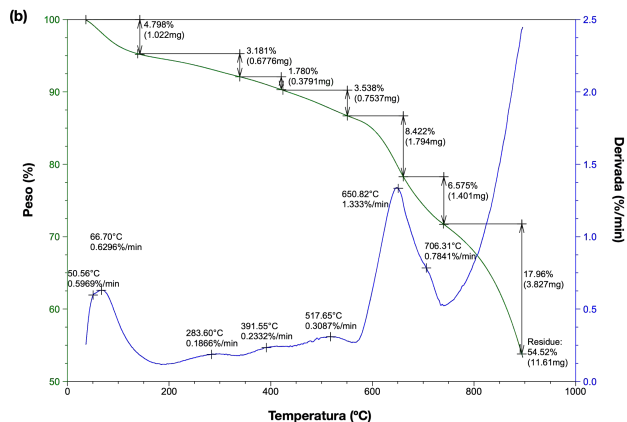
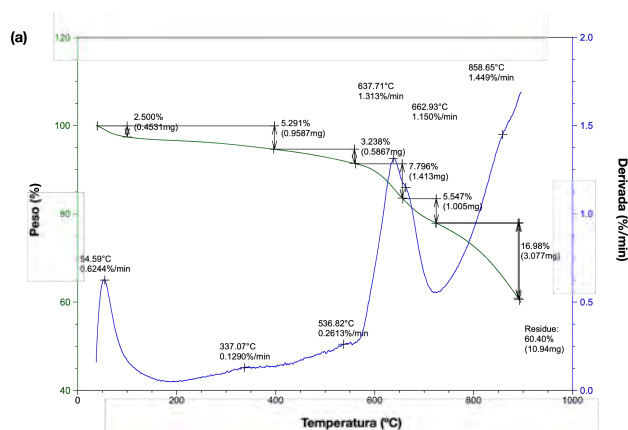


FIGURA 6. Termogramas de biocarbón proveniente de a) *S. Fluitans* III, b) *S. Natans* VII y c) mezcla de sargazos.

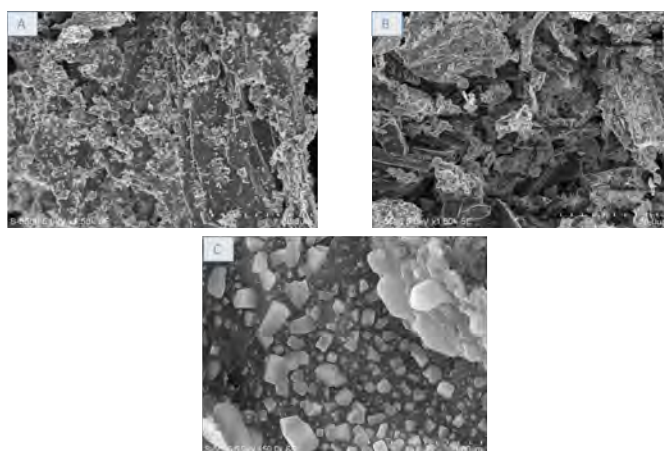


FIGURA 7. Morfología de a) *S. fluitans* III, b) biocarbon a 500x y c) biocarbon a 50000x.



4. CONCLUSIONES

Se validó experimentalmente la pirólisis de biomasa de sargazo utilizando energía solar concentrada en el reactor de pirólisis tipo Auger SARPIER. La radiación solar concentrada por un horno solar de alto flujo (HoSIER) fue absorbida en un receptor volumétrico, con el fin de precalentar el flujo de aire de proceso que ingresa al intercambiador de calor del reactor hasta 1003°C. Esta transferencia térmica posibilitó que la zona de reacción alcanzara temperaturas máximas de 634°C y una temperatura promedio de operación de 561°C±50, condiciones adecuadas para la conversión termoquímica eficiente del sargazo en productos de pirólisis, especialmente es carbón. A estas condiciones se obtuvieron rendimientos a carbón del 33 al 56%, los cuales cambian por los diferentes tiempos de residencia.

El carbón que se obtuvo fue un carbón amorfo con un alto porcentaje en peso de NaCl, KCl, CaCO₃, CaO, MgO. La presencia de estos compuestos sugieren que podría utilizarse como biofertilizante, sin embargo es necesario realizar estudios complementarios que permitan evaluar su posible aplicación

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico de J.J Quiñones Aguilar por la operación y mantenimiento del horno solar del IER. A María Luisa Ramón por el análisis DRX, y a Patricia Altuzar por el análisis TGA.

REFERENCIAS

Artículos

- [1]. Vázquez-Delfín E, Freile-Pelegrín Y, Salazar Garibay A, Serviere Zaragoza, Méndez Rodríguez, L, Robledo D. *Species composition and chemical characterization of Sargassum influx at six different locations along the Mexican Caribbean coast*. Science of The Total Environment 795: 148852 (2021). 10.1016/j.scitotenv.2021.148852.
- [2]. Salazar-Cruz, B.A., Zapien-Castillo, S., Hernández-Zamora, G., Rivera-Armenta, J.L. *Investigation of the performance of asphalt binder modified by sargassum*, Construction and Building Materials 271: 121876 (2021). 10.1016/j.conbuildmat.2020.121876.
- [3]. Rossignolo, J.A., Felicio Peres Duran, A.J., Bueno, C., Martinelli Filho, J.E., Savastano Junior H., Gustavo Tonin, F. *Algae application in civil construction: A review with focus on the potential uses of the pelagic Sargassum spp. biomass*. Journal of Environmental Management 303: 114258 (2022). 10.1016/j.jenvman.2021.114258.
- [4]. López Miranda, J.L., Celis, L.B., Estévez, M., Chávez, V., van Tussenbroek, B.I., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rosillo Pantoja, I., Masia, L., Cauch-Kantun, C., and Silva R. *Commercial Potential of Pelagic Sargassum spp. in Mexico* Front. Mar. Sci., 8 (2021). 10.3389/fmars.2021.768470.
- [5]. García-Sánchez M., Graham C., Vera E., Escalante-Mancera E., Álvarez-Filip L., van Tussenbroek B.I. *Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean*, Aquatic Botany 167: 103275 (2020). 10.1016/j.aquabot.2020.103275.
- [6]. Román-Roldán N.I, Ituna Yudonago J.F., López-Ortiz A, Rodríguez-Ramírez J, Sandoval-Torres S. *A new air recirculation system for homogeneous solar drying: Computational fluid dynamics approach*, Renewable Energy 179:1727 (2021). 10.1016/j.renene.2021.07.134.
- [7]. Seehar, T. H., Toor, S. S., Sharma, K., Nielsen, A. H., Pedersen, T. H., & Rosendahl, L. A. *Influence of process conditions on hydrothermal liquefaction of eucalyptus biomass for biocrude production and investigation of the inorganics distribution*. Sustainable Energy & Fuels, 5(5): 1477-1487 (2021). 10.1039/D0SE01634A
- [8]. López-Sosa, L., Alvarado-Flores, J., Corral-Huacuz, J., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R., Guevara Martínez, S., Morales-Máximo, M. *A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic Sargassum spp. as a Solid Biofuel Energy Source*. Applied Science, 10(23) (2020). 10.3390/app10238706
- [9]. O. Farobie, A. Amrullah, A. Bayu, N. Syaftika, L. Aisya Anis, E. Hartulistiyoso. *In-depth study of bio-oil and biochar production from macroalgae Sargassum sp. via slow pyrolysis*. RSC Adv, 12: 9567 (2022). 10.1039/D2RA00702A



Heidi Isabel Villafán Vidales. es investigadora titular A del Instituto de Energías Renovables-UNAM (IER-UNAM). Es Ingeniera Química por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y doctora en Ingeniería en Energía por la UNAM. Del 2009 al 2011 fue investigadora postdoctoral en dos instituciones: Procédés, Matériaux et Énergie Solaire del Centre National de la Recherche Scientifique (PROMES-CNRS, Francia) y la Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa. Desde el





2024 es investigadora Nivel II del Sistema Nacional de Investigadores. Sus líneas de investigación son: reactores solares, procesos termoquímicos solares y concentración solar.



Ernesto Anguera Romero. Es investigador postdoctoral en el Instituto de Energías Renovables-UNAM (IER-UNAM). Es Ingeniero Mecánico Eléctrico por la Universidad Nacional Autónoma de México y doctor en Ingeniería en Energía por la UNAM. Sus líneas de investigación son: concentración solar fotovoltaica, concentración solar no formadora de imagen, diseño mecánico de concentradores, ópticas secundarias y homogeneización de flujo radiativo.



N. Aracely Cisneros Cárdenas es técnica académica especializada en la Plataforma Solar de Hermosillo, adscrita al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora. Es ingeniera química y doctora en Ciencias de la Ingeniería por la misma institución. De 2023 a 2025 realizó una estancia posdoctoral financiada por la DGAPA-UNAM en el Instituto de Energías Renovables, donde desarrolló investigación en

pirólisis solar en reactores termoquímicos. Desde 2025 forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores con nivel C. Sus líneas de investigación incluyen la óptica de concentración solar, pirólisis solar y el diseño y evaluación de reactores solares.

Arturo Aspiazu Méndez. Es doctor en Ingeniería en Energía por la UNAM. Actualmente colabora con el grupo de Concentración Solar y el LACYQS. Estudió Ingeniería Química en la Facultad de Química de la UNAM. Realizó sus estudios de maestría en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Asimismo, realizó sus estudios de doctorado en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, cuyo proyecto de investigación constó en el desarrollo teórico y experimental de un reactor de pirólisis solar con residuos agrícolas para la producción de energía, mejoradores de suelo y captura de carbono.





Diseño de plantas de generación de energía usando la norma PSD-1 de ASME

PAMELA F. NELSON¹, LIZ ADEANEZ AMBRUSTER SÁNCHEZ¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, CdMx, 04510, México

Autora de correspondencia: Pamela F. Nelson (e-mail: pamelanelson@ingenieria.unam.edu).

RESUMEN El estándar sobre diseño de sistemas de planta proporciona requisitos y orientación para procesos, metodologías y herramientas de diseño que permitirán a los diseñadores proporcionar diseños más seguros y eficientes con riesgos cuantificados. Esta norma es para el diseño de sistemas de planta en instalaciones con potencial de riesgos significativos para los trabajadores, la seguridad pública o el medio ambiente. Proporciona un flujo de trabajo que permite a los propietarios de plantas, diseñadores y otras partes interesadas ejecutar proyectos, minimizando errores y omisiones en el proceso de diseño y generando mejores resultados en términos de costos y plazos para sus usuarios. Las evaluaciones de riesgos incluyen la identificación de peligros y la evaluación de secuencias de eventos peligrosos, incluidas sus probabilidades y consecuencias. Se incluyen evaluaciones para abordar los riesgos de seguridad y de producción. Los riesgos de producción incluyen el impacto de la falta de disponibilidad de componentes tanto relacionados con la seguridad como no relacionados con la seguridad. Una estructura, sistema o componente puede no estar disponible debido a una falla, o puede no estar disponible debido a una inspección, prueba o mantenimiento. Tanto los riesgos de seguridad como los de producción se caracterizan y se comparan con los objetivos establecidos. Cuando no se cumplen los objetivos, se identifican recomendaciones para barreras adicionales para mitigar o evitar eventos no deseados. El resultado final de estas actividades de evaluación de riesgos es una lista de objetivos de disponibilidad que son insumos para el diseño. En este trabajo se presenta la metodología desarrollada aplicada al diseño de un microrreactor en desarrollo en la Universidad Nacional Autónoma de México, nombrado Mizton.

PALABRAS CLAVE: Análisis de riesgos, Diseño de plantas, Riesgos de seguridad, salud y ambiente (HSE), Riesgos de producción.

1. INTRODUCCIÓN

La norma de Diseño de Sistemas de Planta (ASME PSD-1) [1, 2, 3, 4, 5] es una norma tecnológicamente neutral para el diseño de instalaciones con potencial de riesgos significativos para la salud y seguridad del público, los trabajadores y la protección del medio ambiente (HSE, por sus siglas en inglés). Es aplicable a la generación de energía eléctrica, la refinación de petróleo, la producción de petróleo y gas natural, la industria petroquímica, química y farmacéutica, y el tratamiento y almacenamiento de residuos peligrosos, entre otras. Sus aplicaciones incluyen: instalaciones de generación de energía fósil (p. ej., carbón, gas natural, etc.); instalaciones de generación de energía nuclear; refinación de petróleo; producción de petróleo y gas natural; petroquímica; química; y plantas e instalaciones de residuos peligrosos; entre otras industrias. La norma integra la ingeniería de sistemas, la evaluación de riesgos y el diseño probabilístico en los procesos tradicionales de ingeniería de planta. Integra procesos y métodos de licenciamiento y diseño informados en el riesgo y basados en el desempeño en el flujo de trabajo de ingeniería de diseño.

Los procesos de la PSD-1 se conciben como mejoras a las prácticas actuales de diseño de la industria con el objetivo de reducir errores u omisiones que pueden incrementar los costos de diseño, construcción, operación, mantenimiento, descontaminación, desmantelamiento y disposición final. Esto contribuirá a la reducción de los riesgos técnicos, de costos y de plazos en la construcción de nuevas instalaciones, brindando mayor certeza en la obtención de licencias, seguridad en la construcción y mayor disponibilidad de la planta. Los tres procesos de diseño que se centran en la Norma PSD-1 son:

- Incorporar e integrar los procesos, prácticas y herramientas de diseño de ingeniería de sistemas con los



- procesos, prácticas y herramientas de diseño de ingeniería arquitectónica tradicionales.
- Realizar evaluaciones y análisis de riesgos de los procesos de la planta en las primeras fases del diseño que (a) permitan la identificación temprana de riesgos, incluyendo estrategias para evitarlos y mitigarlos, (b) avancen a medida que el diseño madura, y (c) proporcionen estructura para el desarrollo de una evaluación cuantitativa de riesgos.
- Incorporar e integrar procesos, prácticas y herramientas de diseño probabilístico basado en riesgos con los procesos de diseño determinista tradicionales, utilizando objetivos de confiabilidad y disponibilidad.

Es importante tener en cuenta que la norma PSD-1 está diseñada para múltiples industrias. Por lo tanto, los paradigmas y la terminología utilizados pueden diferir del uso en cada industria. La Sección 1-2, Definiciones y Acrónimos, sirve de puente para facilitar la identificación de la relación entre la terminología de la PSD-1 y la terminología comúnmente utilizada en las industrias a las que se aplica.

1.1 Evaluación de riesgos en PSD-1.

Dado que PSD-1 se centra en la integración de consideraciones de riesgo y rendimiento en el proceso de diseño, promoviendo diseños seguros y eficientes, se requiere la realización de una evaluación de riesgos para identificar y mitigar posibles accidentes mediante la adaptación del diseño de la instalación. En este estudio se utilizó el método de Análisis Probabilístico de Seguridad (APS) para cuantificar los riesgos para consecuencias de HSE y pérdidas de producción.

Para proceder con el análisis de riesgos, se requiere mucha información que debe ser proporcionada por el cliente e incluida en la PSD-1 como «Requisitos Técnicos y de Diseño Iniciales». El objetivo de esta sección de la norma es procesar los Requisitos Técnicos del Contrato Conformado (CCTR). Los CCTR deben proporcionar la información necesaria para cumplir con los requisitos de la sección H.3: Evaluaciones de Riesgos para el Diseño Inicial. La sección H.3 de la PSD-1 es a nivel funcional, ya que para un diseño inicial no se dispone de información precisa sobre los sistemas y componentes. Los resultados obtenidos y procesados se utilizan para desarrollar las secciones H.4 y H.5, a nivel de sistema y componente, respectivamente.

La Figura 1 muestra la interactividad de la norma: el grupo de diseño (SEDI, por sus iniciales en inglés) comienza las actividades para el diseño inicial de la planta usando los

requisitos técnicos. La arquitectura funcional se evalúa por el grupo de análisis de riesgos (PRE, por sus siglas en inglés) y el grupo de diseño de componentes (PDM, por sus siglas en inglés) procede, usando métodos probabilísticos, si se determina útil.

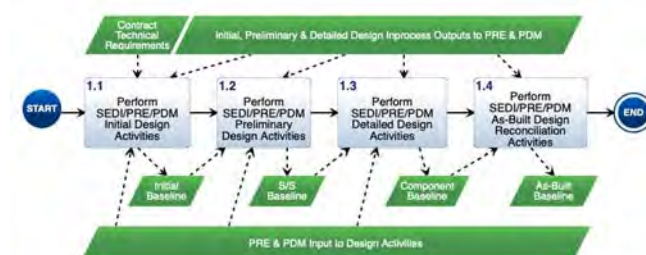


FIGURA 1. Diagrama de flujo de actividades de PSD-1.

2. OBJETIVOS DE HSE Y PRODUCCIÓN

En las primeras etapas del diseño, se establecen criterios de aceptación para la fase operativa de la planta. Estos criterios incluyen objetivos de salud, seguridad y medio ambiente (HSE) y objetivos de producción. Por ejemplo, un objetivo de HSE podría ser evitar que se exceda una cantidad específica de una liberación tóxica de la planta. Un objetivo de producción podría ser producir una cantidad específica de producto anualmente. El objetivo de la PSD-1 es proporcionar un diseño de planta capaz, con alta certeza, de cumplir tanto los objetivos de HSE como los de producción (es decir, los objetivos de origen).

Los peligros de HSE y de producción se identifican y evalúan a lo largo del proceso de diseño. Se realizan evaluaciones de riesgos para evaluar los riesgos que afectan al cumplimiento de los objetivos de HSE y de producción. Los procesos de la PSD-1 evalúan tanto los riesgos de HSE como los de producción para garantizar que se alcancen los objetivos de seguridad y de producción y que el diseño de la planta esté optimizado para cumplir con ambos objetivos.

Los objetivos de HSE y producción son valores objetivos que se pretenden cumplir durante todo el proceso de diseño mediante un proceso iterativo que utiliza modelos de lógica de riesgos (uno para HSE y otro para producción). El proceso iterativo requiere que los modelos de lógica de riesgos reflejen la instalación tal como fue diseñada. La confirmación de que el diseño cumple con los objetivos de HSE y producción se realiza mediante los modelos de lógica de riesgos. Estos modelos se actualizan conforme avanza el diseño, desde el nivel funcional hasta el nivel de sistema y, finalmente, hasta el nivel de componente.

2.1. Objetivos principales

Un resultado importante de los modelos de lógica de riesgo es la determinación de las indisponibilidades objetivas. Estas indisponibilidades objetivas se determinan de tal manera que, si se cumple cada una, se garantiza el cumplimiento de los objetivos de HSE y Producción. A medida que el diseño madura (es decir, se vuelve más detallado), los modelos de lógica de riesgo se actualizan para reflejar el diseño actualizado y, a continuación, se repite el proceso iterativo descrito anteriormente.

El incumplimiento del objetivo de HSE o de producción puede resultar en mejoras del diseño y reevaluaciones. Cabe destacar que, utilizando los objetivos de indisponibilidad y la identificación de las fuentes de indisponibilidad aplicables, se puede determinar la contribución de cada una de ellas. Esto resulta especialmente útil, ya que una fuente de indisponibilidad es el mantenimiento no planificado, que, por sí mismo, proporciona un objetivo de confiabilidad. Por lo tanto, el método de objetivos de indisponibilidad permite obtener un objetivo de confiabilidad asociado tanto para los objetivos de HSE como para los de producción.

3. DISEÑO CONCEPTUAL DEL MICRORREACTOR

Durante la etapa de diseño conceptual de la instalación y contando con la información relacionada con los objetivos principales de la planta, teniendo la documentación referente a las normativas relacionadas con el tipo de tecnología a emplear, se está en condiciones de realizar análisis de seguridad a nivel funcional. Se caracteriza por ser cuantitativo desde sus inicios, pero no es un requerimiento debido a la poca madurez del diseño con la que se cuenta.

El nivel Función forma parte de la sección H.3 del PSD-1, el cual sugiere, según su estructura (ver Figura 2) identificar peligros, conocidos como eventos iniciadores, delinear secuencias, identificar indisponibilidades y evaluarlas, con el fin de cuantificar la frecuencia de las consecuencias. Esta información se procesa tanto para HSE como para producción por separado.

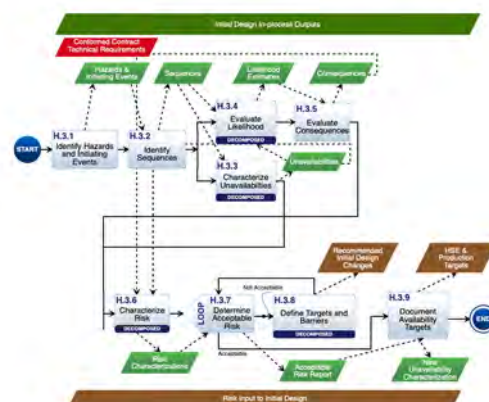


FIGURA 2. Actividades de evaluación de riesgos.

Se resume el análisis para la sección H.3 para Mizton en este artículo. La naturaleza iterativa de la norma implica generar la información, procesarla, evaluar los riesgos, modificar el diseño, documentar el proceso y, posteriormente, volver a evaluar los riesgos a medida que el diseño madura. Una organización responsable requiere una estrecha relación entre el diseñador y el analista.

3.1. Objetivos principales de Mizton

Para el microrreactor Mizton se identificaron los objetivos principales tanto para HSE como para Producción, así como las funciones principales necesarias para evitar consecuencias de HSE y de producción. Estos consideran que se limite la frecuencia de eventos con consecuencias HSE a $5.00E-07/\text{año}$ [6] y que se logre un factor de planta de 96%. Las funciones principales identificadas fueron las de control de reactividad, remoción de calor, y contención de radioactividad.

Para calcular las frecuencias de las secuencias, se estimaron las indisponibilidades planificadas que, considerando el objetivo de producción la indisponibilidad máxima de planta para cumplir con el objetivo es de 14 días que fueron distribuidos en 12 días para mantenimientos preventivos, considerando los tiempos necesarios, y un total de 2 días para fallas no planificadas, como eventos iniciadores que puedan llevar a un apagado repentino de la planta afectando la producción [7].

3.2. Modelos de APS de Mizton

Por lo tanto, hay que identificar todos los eventos iniciadores que pueden afectar la planta tanto para HSE como en Producción y desarrollar secuencias considerando las

funciones capaces de mitigar las consecuencias, sea de HSE o de producción. La identificación de eventos iniciadores se realiza mediante variadas metodologías como FMEA, HAZOP, *WHAT IF* o, como en Mizton, tomando un listado de eventos iniciadores correspondientes a centrales nucleares convencionales y acomodándolos según la tecnología del microrreactor [8, 9].

Se identificaron cinco eventos iniciadores para HSE: disparo de emergencia, pérdida de alimentación eléctrica externa, falla del circuito secundario de potencia, falla de más de tres tubos de calor y falla de más de tres tubos de calor en la conexión con el intercambiador de calor. Para Producción se consideraron los mismos eventos, porque cualquier evento que causa el apagado de la planta baja la generación, y se añadieron dos más: pequeñas pérdidas de refrigerante en el circuito secundario y falla de menos de tres tubos de calor [5].

Estos se modelaron en un software de APS (Saphire) considerando las funciones capaces de mitigarlos, en un árbol de eventos como el de la Figura 3. Los estados finales de cada secuencia, es decir, la consecuencia esperada, se analizaron por separado para HSE y Producción. Para HSE se analizaron en función de la dosis media liberada en el rango del área de exclusión. Este valor se calcula en función del término fuente del microrreactor, que depende de todas las barreras capaces de mitigar esa liberación. Por la poca madurez del diseño, se escogió un enfoque cualitativo considerando Alta Dosis (HD) con un rango de dosis de liberación $<2.5 \times 10$ rem, Dosis Media (MD) con un rango entre $(1; 2.5 \times 10]$ rem y Dosis Baja (DB) >1 rem. En cuanto a la métrica de Producción, se consideraron los tiempos de indisponibilidad (días) que se generarían al ocurrir cada secuencia, teniendo en cuenta los tiempos de mantenimiento correctivos requeridos para cada función que falle.

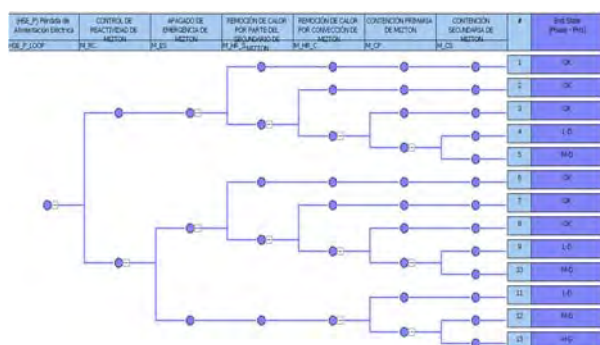


FIGURA 3. Árbol de eventos modelado para la pérdida de energía externa en Mizton.

Una vez modelados, se les asignaron las indisponibilidades (probabilidades de falla más tiempo fuera por mantenimientos, si es el caso) considerando información de algunos componentes de la industria nuclear que cumplen funciones similares [10], y aunque hay un nivel de incertidumbre muy elevado, sirve para entender la contribución de las funciones.

Posteriormente, se modelaron las funciones usando árboles de fallas, considerando las funciones secundarias y terciarias, como son falla de las barras de control, falla de los sensores y falla de los accionadores, para la función de control de la reactividad, ver Figura 4

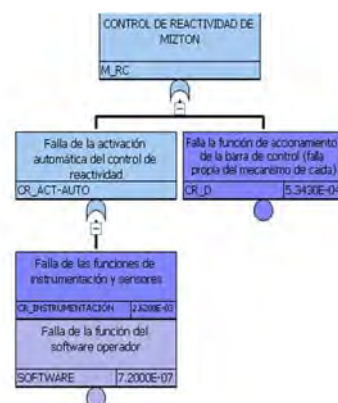


FIGURA 4. Árbol de fallas funcional para el control de la reactividad en Mizton

3.3. Resultados de APS de Mizton

La evaluación de los riesgos proporcionó frecuencias de los diferentes estados finales debajo de los límites regulatorios y, por lo tanto, se procedió a optimizar dichas funciones con el objetivo de asignarles una indisponibilidad que cumpliera con los dos objetivos principales de la planta. La Tabla 1 muestra el cambio del valor de las secuencias, usando las indisponibilidades estimadas originalmente y después usando el software de optimización [11].

TABLA 1. Frecuencias de los estados finales

Estado final	Valor calculado	Valor optimizado
12 D	5.12E-03	6.52E-02
1 D	4.59E-01	6.17E-01
24 D	4.56E-06	2.70E-04
365 D	1.04E-06	6.49E-04
L-D	2.76E-06	4.18E-04
M-D	1.51E-12	2.56E-06
H-D	1.23E-15	4.18E-09

3.4. Curva de frecuencia-consecuencias

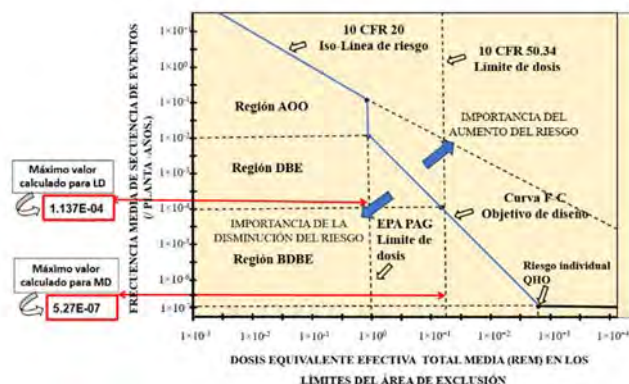
La evaluación de los riesgos proporcionó frecuencias de las diferentes consecuencias involucradas en los estados finales. El uso de curvas de frecuencia-consecuencia es común para todos los tipos de análisis de riesgo para visualizar los riesgos. Figura 5 muestra una matriz de riesgos usada comúnmente en la industria de combustibles fósiles. Estas gráficas son usadas para determinar medidas para bajar los riesgos, a través de bajar la frecuencia de eventos o disminuir las consecuencias.

FRECUENCIA		CONSECUENCIA					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
		Despreciable	Menor	Moderado	Grave	Mayor	Catastrófico
F6	Muy frecuente	B	B	A	A	A	A
F5	Frecuente	C	B	B	A	A	A
F4	Poco frecuente	C	C	B	B	A	A
F3	Raro	C	C	C	B	B	A
F2	Muy raro	C	C	C	C	B	A
F1	Extremadamente raro	C	C	C	C	C	B

FIGURA 5. Curva Típica : frecuencia-consecuencia

La industria nuclear también usa curvas de frecuencia-consecuencia. Se ha desarrollado una como parte del proyecto de modernización de licencia (LMP, por sus siglas en inglés) para los reactores con nuevos diseños [8]. Esta curva se presenta en la Figura 6. Los resultados en la Tabla 1 se grafican en la curva para asegurar que los riesgos (frecuencia-consecuencia) están ubicados a la izquierda de la línea azul. Lo que significa que todas las secuencias están por debajo del límite estipulado regulatoriamente para HSE.

FIGURA 6. Curva Frecuencia-Consecuencia - nuclear



La optimización para Mizton se realizó para aumentar la indisponibilidad de las funciones a valores reales del

mercado nuclear, aspecto que apoya a su vez en la parte económica del diseño de una instalación, disminuyendo costos de construcción y calificación de componentes. Una vez asegurados los riesgos debajo de los límites, los valores generados para las funciones ya vuelven a ser los objetivos de indisponibilidad para los sistemas. Y se repite el proceso de diseño, ahora usando la sección H4 para el diseño preliminar, lo que ya es un diseño de los sistemas de la planta.

4. DISEÑO PRELIMINAR DEL MICRORREACTOR

El microrreactor Mizton, en su etapa conceptual, experimentó muchos cambios según maduraba el diseño y el análisis de seguridad se desarrolló a nivel funcional, donde se seleccionaron las funciones principales que intervinieron. Estas funciones se caracterizaron por ser cajas negras donde solo se definió la función secundaria fundamental y algunas otras funciones de las cuales son dependientes.

Al trascender al nivel de sistemas, se retoma el análisis a nivel funcional, pero iniciando con los árboles de fallas funcionales, dándoles categoría de sistemas a las funciones secundarias que aparecen en esos árboles de fallas y de los cuales ya se conoce la indisponibilidad que deben tener. El siguiente paso es diseñar el sistema para que sea capaz de cumplir con la indisponibilidad asignada cuando se realizó el análisis a nivel funcional

Este análisis generalizado permitió detectar posibles eventos indicadores a nivel general de la instalación, desarrollar secuencias de accidentes y árboles de fallas funcionales para poder identificar las funciones necesarias e imprescindibles en la planta. Mediante este estudio también fue posible optimizar las probabilidades de fallas de esas funciones, considerando las de mayor peso para la seguridad.

Actualmente, el microrreactor Mizton pasó de su etapa conceptual del núcleo a su etapa de diseño inicial. En la Figura 7 se puede apreciar un corte superior del núcleo cilíndrico del microrreactor. La matriz de combustible contiene los combustibles de óxido de uranio con geometría anular, los cuales son atravesados por 733 tubos de calor y 19 barras de control de óxido de berilio. Los tubos de calor usan sodio líquido para transportar el calor del núcleo hacia el circuito de potencia. La función de contención está respaldada por el reflector primario y la protección contra la radiación gamma. La base de soporte permite levantar el reactor del suelo para facilitar la circulación natural de aire por la contención secundaria o el edificio del reactor. También se pueden apreciar las dimensiones del reactor

comparadas con un humano promedio en Latinoamérica de 1.73 de estatura.

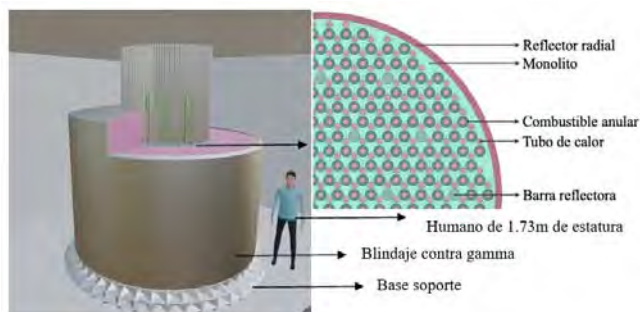


FIGURA 7. Diseño conceptual del microrreactor Mizton.

Una vez definido el diseño preliminar del microrreactor se retornó a los árboles de fallas funcionales como el de la Figura 4 y se definieron los sistemas que van a intervenir en el cumplimiento de esta función de control de reactividad sabiendo ya la indisponibilidad máxima permitida con la que se van a diseñar:

- 1- Sistema mecánico (indisponibilidad máxima $4.24E-03$): Relacionado con la estructura, geometría, alineación de la barra de control, recorrido de entrada y salida del núcleo.
- 2- Sistema de protección del reactor (indisponibilidad máxima $1.46E-02$): Encargado de medir variables provenientes de varias zonas del núcleo del reactor y transformarlas en señales. Su función principal es dar una alerta de cualquier falla antes de la puesta en marcha y durante la operación normal.
- 3- Sistema de control del reactor (indisponibilidad máxima $6.6E-03$): Encargado de interpretar las señales provenientes del Sistema de Protección y llevar a cabo una acción para eliminar el peligro o, en caso de que ya sea inevitable, mitigar las consecuencias.

5. DISEÑO FINAL DEL MICRORREACTOR

Una vez que se tenga el diseño preliminar validado, se sigue con la sección H5 de la norma PSD-1 para desarrollar el diseño final a nivel de componentes. Aunque el diseño del núcleo tiene mucho avance, el diseño a detalle de los sistemas de mitigación y del balance de planta faltan. Un balance de planta comprende todos los sistemas principales y auxiliares que acompañan al reactor, en otras palabras, la

infraestructura no nuclear esencial para la conversión de energía térmica en electricidad, el manejo de fluidos, el control de procesos y el soporte operativo general. Ante ello, cada uno de estos nuevos diseños lo acompaña un balance de planta único, el cual es consecuencia de los requerimientos y objetivos previamente establecidos en las etapas conceptuales de diseño. Además, cada diseño ha optado por diferentes ciclos, fluidos y configuraciones que responden a diferentes demandas tanto en uso como en tamaño. La mayor parte de los diseños de microrreactores utilizan sistemas de conversión Brayton lo que ayuda a compactar el sistema [12].

6. CONCLUSIONES

La contribución más importante de este trabajo es que proporciona directrices para el diseño de plantas de generación de energía con un enfoque en la seguridad y la eficiencia. Destaca la importancia de la evaluación temprana de riesgos para identificar peligros y desarrollar estrategias para mitigarlos. La norma es aplicable en múltiples industrias, incluyendo la energía nuclear y la de combustibles fósiles, e integra prácticas de ingeniería tradicionales con el análisis probabilístico de riesgos. Los autores ilustran la aplicación de esta norma mediante el diseño de un microrreactor nuclear llamado Mizton en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), demostrando cómo el proceso iterativo de evaluación de riesgos ayuda a refinar los objetivos de diseño y a mejorar la disponibilidad y seguridad general de la planta. Las evaluaciones incluyen la definición de objetivos de salud, seguridad y medio ambiente (HSE), así como de objetivos de producción, garantizando que el diseño cumpla con las normas regulatorias y la eficiencia operativa.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por brindar apoyo financiero a Liz Adeanez Ambruster Sánchez. A la Universidad Nacional Autónoma de México por su apoyo a través del proyecto PAPIIT IN100824: Diseño conceptual de un microrreactor nuclear de usos múltiples. Los autores expresan su agradecimiento al CONAHCYT, ahora integrado en la SECIHTI, por los apoyos a la investigación a través del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras. Agradecen también a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México por brindar apoyo a la realización de estos estudios como parte de las actividades de investigación y desarrollo dentro de la labor de académicos.



REFERENCIAS

- [1] American Society of Mechanical Engineers, PDS-1: Plant Systems Design, New York: ASME, To be published. R. S. Hill and M. deLamare, PVP2025-155149 A New ASME Standard: Plant Systems Design, in ASME PVP, Montreal, Canada, 2025.
- [2] J. Harper, R. S. Hill, M. deLamare "PVP2025-156172 *Systems Engineering in the ASME Plant Systems Design Standard*," in ASME PVP, Montreal, Canada, 2025.
- [3] P. F. Nelson, A. Coutts, G. Hudson, "PVP2025-156169 *Risk evaluations in Plant Systems Design*," in ASME PVP, Montreal, Canada, 2025.
- [4] A. Mann, R. S. Hill, M. Diaconeasa, B.M.E. Pellereau, PVP2025-154740 *Probabilistic Component Design Assessments in Plant Systems Design: a Case Study*, in ASME PVP, Montreal, Canada, 2025.
- [5] A. Mann, B. M. E. Pellereau, M. Diaconeasa, R. S. Hill and C. Ng, PVP2025-154737 *Implementing Probabilistic Component Design Methods in Plant Systems Design*, in PVP, Montreal, Canada, 2025.
- [6] United States Nuclear Regulatory Commission, *NRC Regulations Title 10, Code of Federal Regulations*. Accessed: Feb. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doccollections/cfr/index.html>
- [7] International Atomic Energy Agency, *Maintenance, Surveillance and In-Service Inspection in Nuclear Power Plants* (No. NS-G-2.6), Viena, Oct. 2002.
- [8] W. L. Moe, *Risk-Informed Performance-Based Technology Inclusive Guidance for Non-Light Water Reactor Licensing Basis Development* (NEI 18-04), Aug. 2019. doi: 10.2172/1557649.
- [9] A. Afzali et al., *Modernization of Technical Requirements for Licensing of Advanced Non-Light Water Reactors Westinghouse eVinci TM Micro-Reactor Licensing Modernization Project Demonstration*, 2019. TON: EMR_LTR_190010.
- [10] Idaho National Laboratory, *Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants*, Feb. 2007. ADAMS: ML070650652.
- [11] Orestes Castillo Hernández, *Risk-Informed Design: A New Approach in the Nuclear Industry*, en *Memorias del Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana*. 2024. Available: <https://www.sociedadnuclear.mx/memorias/>
- [12] Ekinci, F., Guzel, M. S., Acici, K., & Asuroglu, T. (2024). *The Future of Microreactors: Technological Advantages, Economic Challenges, and Innovative Licensing Solutions with Blockchain*. Applied

Sciences, 14(15), Article 15.
<https://doi.org/10.3390/app14156673>



Pamela Fran Nelson Edelstein. Desde 2001 es académica en la UNAM y es líder de la línea de Análisis de Riesgos en la Facultad de Ingeniería. Obtuvo su licenciatura y maestría en UCLA (1982, 1985) y el doctorado en Ingeniería en Energía en la UNAM (2016). Inició su carrera profesional en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (ahora INEEL) apoyando en el desarrollo del Análisis Probabilístico de Seguridad (APS), los procedimientos de operación de emergencia y los niveles de acción de emergencia de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde. Posteriormente trabajó para el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua apoyando en actividades para la predicción de eventos naturales con el cambio climático. Es miembro titular de la Academia de Ingeniería de México, siendo la Presidenta de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Nuclear (2022-2024), miembro fundador de la Sociedad Nuclear Mexicana, Presidenta del subcomité que desarrolla una norma para diseño de sistemas de plantas con peligro y miembro de la Junta Directiva de la Códigos y Estándares Nucleares de la American Society of Mechanical Engineers..



Liz A. Ambruster Sánchez. Estudiante de último semestre de la maestría en Ingeniería en Energía en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ubicada en la Ciudad de México, México. Graduada en 2022 de la carrera de Ingeniería en Tecnologías Nucleares y Energéticas en la Universidad de La Habana, Cuba. Desde su titulación se ha inclinado por los temas energéticos nucleares, basándose principalmente en el área de análisis de riesgos para instalaciones potencialmente peligrosas. Forma parte del grupo de trabajo del Proyecto PAPIIT IN100824: Conceptual design of a multipurpose nuclear microreactor (2024-2026) dedicándose a la parte de análisis probabilístico de seguridad. Trabajó como reserva científica en el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Tecnología Nuclear en La Habana, Cuba, en el año 2023. Sus principales actividades consistían en gestión del proceso de irradiación y estudio de la dosimetría de altas dosis. Miembro activo de la Sociedad Nuclear Mexicana y de la Asociación de Jóvenes por la Energía Nuclear en México.





Diseño y construcción de una trituradora PET para apoyo al centro de acopio de la UAM-Azcapotzalco

PEDRO DAVID GARCÍA SUÁREZ¹, ELOY ARMANDO GUTIÉRREZ GARCÍA¹, VALERIANO SALOMON ÁLVAREZ SALAZAR¹, GILBERTO DOMINGO ÁLVAREZ MIRANDA, CARLOS ALEJANDRO VARGAS².

¹Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, CDMX 02128, México.

²Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco, CDMX 02128, México.

Autor de Correspondencia: Pedro David García Suarez (e-mail: al2203032680@azc.uam.mx).

RESUMEN Este trabajo tiene como objetivo principal el diseño y construcción de una maquina trituradora de PET (tereftalato de polietileno) con el fin de apoyar las actividades del Centro de Acopio de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. Este dispositivo busca mejorar la eficiencia en el manejo y reducción de volumen de los residuos plásticos recolectados, facilitando su almacenamiento, transporte y reciclaje. Incluye análisis de necesidades, como el diseño mecánico y la construcción de una trituradora funcional, así como un sistema de trituración por cuchillas rotativas accionadas por un motor eléctrico. El proyecto contribuye al fortalecimiento de las acciones ambientales de la UAM-A promoviendo la cultura del reciclaje dentro de la comunidad universitaria.

PALABRAS CLAVE: Tritradora PET, Reciclaje de plástico, Diseño mecánico, Sustentabilidad, Mecanismo de corte.

1. INTRODUCCIÓN

El plástico es un material caracterizado por su ligereza, durabilidad, bajo costo y facilidad de modificación. Su estructura está compuesta por polímeros, los cuales son macromoléculas orgánicas formadas por cadenas repetitivas de unidades de carbono, conocidas como monómeros [1].

El PET (Tereftalato de polietileno) es un termoplástico que pertenece al grupo de los poliésteres, por ello es uno de los plásticos más utilizados en el mundo debido a su excelente resistencia mecánica y térmica [2], se destaca como un material reciclable, permitiendo su transformación en fibras textiles o productos de posconsumo.

En México, hasta el año 2020, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales emitió un informe llamado “Diagnostico básico para la gestión Integral de Residuos” el cual indica que la generación de residuos PET en México es de 0.944kg/hab/día per cápita [3].

La Ciudad de México tiene un problema significativo con los desechos de plásticos, en particular el PET, se estima que al día se generan 12,335 toneladas de desechos, donde el 20 de los desechos generados son residuos de plásticos, a pesar de que el 97% es recolectado, solo el 24% se recicla [4].

El proyecto fue construir una trituradora de PET para maximizar el aprovechamiento de espacio en el Centro de Acopio de la Unidad Azcapotzalco. Permitiendo procesar los 5.75 a 20 kg semanales de botellas generadas por la comunidad universitaria, mediante un mecanismo de dos navajas fijas y un eje de navajas rotatorio como se muestra en la Figura 1. Lo cual al ser triturado facilitar a su manejo y entrega a la empresa RECUPERA. este proyecto fue financiado por los alumnos y profesores, así mismo donado a la Universidad.



1.1 Propiedades del PET

El PET es un material termoplástico, lo que significa que puede ser reblandecido y moldeado bajo calor. Es utilizado en una variedad de productos, principalmente en envases de bebidas y alimentos, textiles, y otros artículos de consumo. Las propiedades clave del PET incluyen:

Resistencia mecánica: Alta resistencia al impacto, lo que lo hace ideal para botellas y envases.

Transparencia: El PET es un plástico transparente, lo que lo hace atractivo para el envasado de productos como bebidas.

Reciclabilidad: El PET es 100% reciclable, pero debido a su alto volumen de consumo, la falta de infraestructura adecuada de reciclaje ha generado grandes cantidades de desechos plásticos.

1.2 Identificación y codificación del tipo de plásticos.

La identificación y la codificación del tipo de plástico ha sido desarrollada por The Society of the Plastic Inc. (SPI), por sus siglas en inglés, en los Estados Unidos y adoptado en varios países latinoamericanos y europeos [5]. El sistema permite la identificación de plásticos más comunes.

El símbolo de identificación se compone de tres flechas que forman un triángulo con un número, que representa el tipo de material. Este está ubicado en el fondo del material de los envases como se muestra en la figura 1.



FIGURA 1. Símbolo de identificación en botella de plástico comercial.

2. Parámetros de diseño.

En el proceso del diseño de la trituradora, es fundamental tener el conocimiento de los materiales a emplear, porque posibilita el seleccionar o especificar una máquina idónea para emplear el trabajo con la finalidad de diseñar un modelo más conveniente y eficiente, se deben de tomar en cuenta los

siguientes criterios y necesidades de los operadores.

- Costo de fabricación.
- Seguridad de operación.
- Facilidad de mantenimiento.
- Ergonomía de la máquina.

2.1. Diseño de una Trituradora de PET

En la tabla 1. Se muestran los componentes principales que necesitan para construir una trituradora de PET.

TABLA 1. Componentes Principales

Componente	Función
Tolva de alimentación	Entrada de las botellas de PET.
Cámara de trituración	Contiene las cuchillas y eje que cortan el PET.
Cuchillas	Elementos cortantes del PET.
Motor eléctrico	Proporciona la potencia para mover el eje.
Eje motriz	Transmite el movimiento del motor a las cuchillas.
Transmisión	Regula la velocidad y fuerza.
Estructura y/o bastidor	Sostiene todos los componentes.
Rejilla inferior	Filtra el material.
Sistema de seguridad	Paro de emergencia.

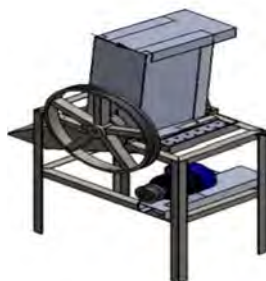


FIGURA 2. Esquema de Trituradora de PET, desarrollada para la UAM-A.

3. Beneficios de una Trituradora de PET para la UAM-A

La implementación de una máquina trituradora de PET en la UAM-A, representa una acción estratégica en favor del desarrollo sustentable, la gestión responsable de residuos y la innovación académica.

La UAM Azcapotzalco, en colaboración con ECOCE y RECUPERA, ha establecido un programa integral de reciclaje de residuos plásticos, incluyendo envases de PET y empaques flexibles. La incorporación de una trituradora de PET potenciaría este programa al permitir el procesamiento interno de los residuos, facilitando su manejo y reciclaje eficiente.

3.1 Reducción del volumen de residuos.

Una trituradora de PET disminuye significativamente el tamaño de los residuos plásticos, lo que optimiza el espacio de almacenamiento y reduce la frecuencia de recolección. Esto contribuye a una gestión más eficiente de los residuos dentro del campus.

3.2 Educación y Conciencia Ambiental.

La presencia de una trituradora en el campus sirve como herramienta educativa, sensibilizando a estudiantes y personal sobre la importancia del reciclaje y la gestión adecuada de residuos. Además, se alinea con las campañas de comunicación interna y seminarios virtuales organizados por ECOCE para fomentar prácticas sostenibles.

3.3 Ahorro de recursos y reducción de emisiones.

El reciclaje de PET triturado puede traducirse en ahorros significativos de agua y energía, así como en la disminución de emisiones de CO₂. ECOCE proporciona constancias que cuantifican estos beneficios ambientales, reforzando el compromiso de la UAM-A con la sustentabilidad.

3.4 Contribución a la economía Circular.

Al procesar internamente los residuos de PET, la universidad puede cerrar el ciclo de reciclaje, transformando los desechos en nuevos productos o materiales reutilizables. Esto refuerza el modelo de economía circular y posiciona a la UAM-A, como líder en prácticas sostenibles dentro del ámbito académico.

3.5 Novedad frente a otros trabajos recientes.

Enfoque académico y comunitario: A diferencia de trituradoras industriales o comerciales, este proyecto fue desarrollado en un entorno universitario con fines tanto operativos como didácticos. Su diseño involucra a estudiantes y docentes en el aprendizaje práctico de ingeniería aplicada, fortaleciendo el vínculo entre teoría y práctica.

Diseño adaptado al contexto local: La trituradora fue diseñada específicamente para las condiciones del Centro de Acopio de la UAM-A, considerando limitaciones de espacio, presupuesto y tipo de residuo. Esto contrasta con diseños genéricos que no responden a necesidades particulares.

En conjunto, esta iniciativa no solo mejora la gestión de residuos sólidos, sino que también posiciona a la UAM Azcapotzalco como una institución comprometida con la sustentabilidad, la innovación tecnológica y la formación de profesionales conscientes del entorno.



FIGURA 2. Foto final de trituradora PET. De izquierda a derecha, P. D. G. S., V. S. A. S., C. A. V. y E. A. G. G.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo del presente proyecto permitió comprobar la viabilidad técnico, económica y funcional del diseño y construcción de una trituradora de PET a escala institucional. El prototipo construido alcanzó una capacidad de trituración adecuada para las necesidades del Centro de Acopio de la



UAM-Azcapotzalco, reduciendo significativamente el volumen de residuos plásticos y facilitando su posterior reciclaje.

El sistema mecánico de corte y el diseño estructural de la máquina demostraron ser robustos y seguros, cumpliendo con las exigencias de operación continua. Además, el proyecto fomentó el aprendizaje interdisciplinario entre los participantes, integrando conocimientos de diseño mecánico, manufactura, sustentabilidad y gestión de residuos sólidos.

Desde el punto de vista ambiental, el equipo representa una alternativa práctica y sustentable para el tratamiento del PET en campus universitarios, al mismo tiempo que contribuye a la sensibilización y participación de la comunidad en prácticas de reciclaje responsables.

Finalmente, este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos relacionados con el reciclaje de plásticos, así como su aplicación en comunidades que carecen de infraestructura industrial para el manejo de residuos.

Esta iniciativa representa un paso significativo hacia la implementación de soluciones tecnológicas accesibles para la gestión de residuos en instituciones educativas.

AGRADECIMIENTOS

Todos los coautores agradecemos el apoyo de los Técnicos del taller mecánico de la UAM-A; Ángel Rodríguez Sandoval, César Méndez Alavez y en especial a la almacenista Isela Chávez Robledo, por su gran apoyo tiempo y paciencia. Muchas Gracias.

REFERENCIAS

Artículos

- [1]. Padilla, M. A. Herrera, and M. Godínez. *Diseño y prototipo de una máquina trituradora de PET*. Culcyt, Sustentabilidad, vol. 12, no. 57, pp. 25-30, 2019.
- [2]. Andrady, A. L. y Neal, M. A. *Applications and societal benefits of plastics*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 364, no. 1526, pp. 1977-1984, 2009.
- [3]. Taco, González, Bonifaz. *Diseño y construcción de una máquina trituradora y granuladora de plástico de baja densidad como una herramienta de reciclaje*. Revista de Tecnología y Ciencia, vol. 5, no. 2, pp. 15-28, 2021.
- [4]. B. Geyer, R., Jambeck et. al. *Producción, uso y destino de todos los plásticos fabricados*. Science Advances, vol. 3, no. 7, e1700782, 2017.

- [5]. Singh, N., et al., *Reciclaje de residuos plásticos sólidos: Una revisión del estado del arte y futuras aplicaciones*. Composites Part B: Engineering, vol. 115, pp. 409-422, 2017.

Memorias en Congreso

- [1]. López Ramírez, A., & Méndez Salazar, P. (2022). *Diseño y construcción de una trituradora de botellas PET para aplicación doméstica*. En Memorias del 5º Congreso Nacional de Ingeniería Sustentable (pp. 45–52). Universidad Politécnica de Chiapas.
- [2]. Hernández Torres, R., & Velázquez Gómez, L. (2023). *Optimización de cuchillas para trituración de PET reciclado mediante análisis por elementos finitos*. En Memorias del Congreso Internacional de Innovación en Ingeniería Mecánica y Energías Renovables (CIIMER) (pp. 87–95). Instituto Tecnológico de Morelia.
- [3]. Ramírez López, M. A., & Cruz Moreno, J. L. (2021). *Evaluación de rendimiento mecánico de una trituradora de PET de doble eje para uso industrial*. En Memorias del Congreso Nacional de Ingeniería Aplicada (pp. 133–140). Instituto Tecnológico de Culiacán.
- [4]. González Pérez, L. E., & Torres Ríos, C. A. (2020). *Prototipo de trituradora de PET con sistema de filtrado por tamaño de partícula para reciclaje selectivo*. En X Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica (CLIM) (pp. 211–219). Universidad Nacional de Colombia.
- [5]. Mejía Sandoval, P., & Vargas Téllez, A. (2019). *Diseño ergonómico de trituradoras manuales de PET para zonas rurales*. En Memorias del Congreso Internacional sobre Energía y Medio Ambiente (CIEMA) (pp. 88–95). Universidad Veracruzana.

Libros

- [1]. Ehrenstein, G. W. (2001). *Polymeric Materials: Structure, Properties, Applications*. Hanser Publishers.





Modelo dinámico de orden fraccional de la producción de xilitol y etanol a partir de residuos agroindustriales en un reactor por lotes

ROLANDO ZENTENO-CATEMAXCA¹, HÉCTOR PUEBLA¹, ELISEO HERNANDEZ-MARTINEZ^{2*}

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Energía, CDMX, 02120, México

²Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Xalapa, Veracruz, 91090, México

Autor de Correspondencia: E. Hernández-Martínez (e-mail: elisehernandez@uv.mx).

RESUMEN El modelado cinético contribuye en la evaluación y selección de condiciones de operación para la mejora de la producción de xilitol y etanol. Sin embargo, por simplicidad estos omiten fenómenos de transporte o de calidad del mezclado. Una alternativa no convencional es la extensión de modelos de orden fraccional α que aportan un mayor grado de libertad y que no se han explorado ampliamente. Este trabajo, propone un modelo dinámico fraccional (MDF) aplicado a dos casos de estudio. Primero, el MDF se aplicó para la producción de xilitol (P_X) a partir de cáscara de plátano a 100, 150, 200rpm y 30, 35, 40°C. Como segundo caso, se consideró un reporte de literatura sobre la producción de etanol a diferentes condiciones de aireación (0, 0.1, 0.2vvm) y concentración de biomasa inicial. Los parámetros del modelo (α, μ_{max}) se estimaron mediante una regresión paramétrica en Matlab. En ambos casos de estudio, se observó que α depende de condiciones de operación como la agitación y aireación. En particular se observó que α disminuyó cuando la agitación decreció. Pero aumentó cuando se incrementó la aireación de 0 a 0.1vvm. En contraste con otros reportes, se mostró que α puede contener información fenomenológica inherente del proceso y correlacionarse con las deficiencias en el mezclado o de transporte, sin incluir explícitamente términos de transporte de masa al modelo. Lo que abre la oportunidad de mejorar la descripción de bioprocesos mediante modelos dinámicos fraccionales.

PALABRAS CLAVE: Etanol, Xilitol, Fermentación, Modelado cinético, Cálculo fraccional

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos agroindustriales (e.g., bagazo de caña, cáscara de plátano, mazorcas de maíz) son considerados una fuente lignocelulósica abundante, económica y con potencial para la generación de metabolitos atractivo [1,2]. Esto promueve la economía circular y el aprovechamiento de residuos agroindustriales que comúnmente se desechan al suelo. La biomasa lignocelulósica se constituye principalmente de celulosa (30-50%), hemicelulosa (20-35%) y lignina, que permite el aprovechamiento de azúcares reductores para la generación de productos como xilitol y etanol a través de la fermentación con levaduras, hongos o bacterias [3,4].

El xilitol, es un azúcar de alcohol de bajo índice glucémico y calórico, con propiedades anticariogénica y antimicrobianas. Producido mediante un enfoque catalítico costoso y energéticamente demandante [5]. El etanol, es un alcohol volátil e inflamable, miscible en agua y otros disolventes con alto potencial en el área de alimentos y la generación de biocombustibles ecológicos y ambientalmente amigables [6]. La importancia de estos metabolitos en diferentes sectores ha motivado la producción biotecnológica como una alternativa atractiva y económica. Particularmente, las levaduras del género *Candida* y la *Saccharomyces cerevisiae* se han consolidado como organismos fermentadores para la producción selectiva de xilitol y etanol a partir de hidrolizados hemicelulósicos y celulósicos, respectivamente [4,7]. Mientras que *Pichia stipitis* ha mostrado capacidad para fermentar las pentosas y hexosas de hidrolizados mixtos y producir xilitol y/o etanol [8]. Sin embargo, las condiciones de operación como



temperatura T , pH, agitación (A) y aireación (A_i) pueden afectar la ruta de producción metabólica [8,9,10]. Lo que demanda estudios experimentales exhaustivos y controlados para garantizar un buen desempeño.

El modelado cinético se ha convertido en una herramienta auxiliar para el estudio, diseño y optimización de bioprocesos, con el objetivo de establecer procesos biotecnológicos robustos y competitivos. Numerosos modelos cinéticos para la bioproducción de xilitol y etanol pueden encontrarse en la literatura, de los cuales los no estructurados (o de caja negra) se han preferido por su simplicidad y la capacidad de representar la dinámica grupal de microorganismos y múltiples reacciones biológicas a través de relaciones cinéticas tipo Monod, Tessier y Contois [9,11,12]. Pese a la apropiada representación de bioprocesos, éstos en realidad omiten efectos como la calidad del mezclado o fenómenos de transporte. En cambio, estos fenómenos se incluyen indirectamente en los parámetros que pueden incrementar la incertidumbre para la descripción de múltiples condiciones de operación.

Otra alternativa no tradicional es la descripción del proceso mediante modelos dinámicos fraccionales (MDF), donde las derivadas temporales de orden entero son sustituidas por derivadas de orden fraccional [13,14,15,16]. Los MDF se han dirigido a diferentes áreas de la ciencia e ingeniería, en la descripción de la dinámica de fluidos, epidemiología, transporte por difusión anómala y mecánica cuántica. Sin embargo, su implementación a la descripción de bioprocesos aún es limitada.

En [14] tres procesos de fermentación alcohólica y una hidrólisis térmica modelaron mediante un MDF, mostrando un mejor desempeño en la representación de datos experimentales con respecto al modelado cinético convencional. No obstante, sustituyen cinéticas de Monod por modelos de predador-presa que podrían limitar la capacidad para describir variables del proceso. En [15] se propone un MDF genérico para el tratamiento en continuo de aguas residuales basado en una cinética de Contois y la definición de Caputo para la derivada fraccional. Los resultados numéricos muestran que es posible evaluar la dinámica del sustrato, oxígeno disuelto y la biomasa celular a diferentes órdenes fraccionales (α). Sin embargo, el modelo no fue aplicado experimentalmente. Por otro lado, en [16] se formula un modelo convectivo conformable para la estimación del coeficiente de transferencia de masa ($k_L a$) en biorreactores. El modelo se ajustó con datos experimentales de oxígeno disuelto a diferentes condiciones. Se mostró que α aumentó cuando la viscosidad incrementó y la agitación

disminuyó, sugiriendo que éste podría incorporar significado físico del proceso. Aunque estos estudios resaltan la utilidad de los MDF para mejorar la representación dinámica de variables, todavía no se han explorado profundamente en la evaluación de casos particulares en proceso biotecnológicos.

En ese sentido, el presente estudio propone un MDF para la producción biotecnológica de xilitol y etanol en biorreactores por lotes agitados. El modelo se aplicó para el estudio de dos casos de estudio. En primer lugar, se evaluó la producción de xilitol con *Pichia stipitis* a partir de hidrolizados mixtos de cáscara de plátano. Y como segundo caso se evaluaron las corridas experimentales reportadas en [9] para la producción por lotes de etanol a partir de xilosa, usando *Pichia stipitis* a condiciones microaeróbicas.

2. MÉTODOS

En esta sección se describen las condiciones experimentales para dos procesos de fermentación. La Figura 1, muestra gráficamente el proceso de fermentación de azúcares en un biorreactor por lotes agitado, donde la biomasa celular, el sustrato, el xilitol y etanol se describen en términos de las variables X , S , P_X , P_E , respectivamente.

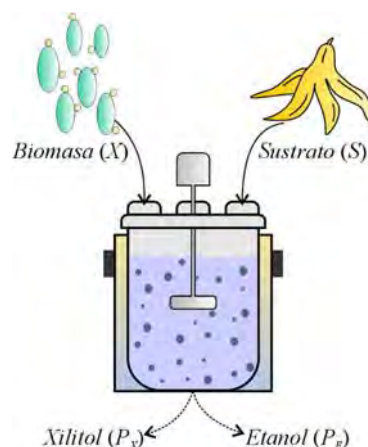


FIGURA 1. Esquema de la producción biotecnológica de xilitol y/o etanol en un biorreactor por lotes agitado.

2.1. Producción de xilitol a partir de hidrolizados mixtos de cáscara de plátano

Se tomó en cuenta un set de 9 corridas experimentales para la producción de xilitol con *Pichis stipitis*, a partir de hidrolizados de cáscara de plátano (*Mussa paradissaca*) como primer caso de estudio. Este constó de las combinaciones de tres niveles de temperatura T (30, 35 y 40°C) y tres niveles de agitación A (100, 150 y 200rpm). En cada caso, se obtuvieron



determinaciones experimentales de xilosa, glucosa y arabinosa como sustratos y xilitol (P_X) y etanol (P_E) como productos. Para el modelado, los sustratos se agruparon en una sola variable S la cual denota los azúcares reductores totales.

2.2. Producción de etanol a partir de medios sintéticos de xilosa

Los autores en [9] estudiaron la fermentación de medios sintéticos de xilosa para la producción de etanol con *Pichia stipitis*, a condiciones microaeróbicas. La fermentación se efectuó en un reactor por lotes con volumen efectivo de 5L a 200rpm, 30°C y pH controlado de 5. El desempeño se evaluó para la combinación de tres niveles de aireación A_i (0, 0.1 y 0.2vvm) con tres diferentes concentraciones de biomasa inicial X_0 (0.3, 1.5 y 3g/L). Las mediciones experimentales están constituidas por concentraciones de xilosa como sustrato S , biomasa X , y etanol P_E .

3. MODELO DINÁMICO FRACCIONAL

El modelado dinámico fraccional consistió en un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas para las cuatro variables X , S , P_X y P_E :

$$\frac{d^\alpha X}{dt^\alpha} = \frac{\mu_{\max} S}{K_S + S} \left(1 - \frac{P_E}{P_{E,\max}} \right)^I \quad (1)$$

$$\frac{d^\alpha S}{dt^\alpha} = -\frac{1}{Y_{X/S}} \frac{\mu_{\max} S}{K_S + S} \left(1 - \frac{P_E}{P_{E,\max}} \right)^I X \quad (2)$$

$$\frac{d^\alpha P_X}{dt^\alpha} = \frac{Y_{P_X/S}}{Y_{X/S}} \frac{\mu_{\max} S}{K_S + S} \left(1 - \frac{P_E}{P_{E,\max}} \right)^I X \quad (3)$$

$$\frac{d^\alpha P_E}{dt^\alpha} = \frac{Y_{P_E/S}}{Y_{X/S}} \frac{\mu_{\max} S}{K_S + S} \left(1 - \frac{P_E}{P_{E,\max}} \right)^I X \quad (4)$$

El modelo considera la cinética de Monod modificada por un término de inhibición por etanol, con base en otros modelos reportados en la literatura para fermentaciones con *Pichia stipitis* [9,12]. Donde $\mu_{\max}$ ($h^{-\alpha}$), es la tasa específica de crecimiento máximo de la biomasa. K_S (g/L) es la constante de saturación media. $P_{E,\max}$ (g/L) es la concentración máxima de etanol donde las células mueren. I (-) es una constante de inhibición. Finalmente, $Y_{X/S}$, $Y_{P_X/S}$ y $Y_{P_E/S}$ son los rendimientos biomasa-sustrato, xilitol-sustrato y etanol-sustrato, respectivamente, en gg^{-1} . Además, α es el exponente de orden fraccional (EOF). En general, cuando $\alpha=1$, se obtiene el caso convencional de modelado de orden entero. Debido a la similitud en los casos de estudio, el MDF

propuesto se aplicó para describir ambos sistemas. Por lo que en el segundo caso bastó con omitir la Ec. (3) ya que no se produjo xilitol. Finalmente, el modelo matemático se discretizó numéricamente y se resolvió para las variables correspondientes considerando las condiciones iniciales de acuerdo con cada corrida experimental.

3.1. Tratamiento de la derivada de orden fraccional

Las derivadas fraccionales del MDF se trataron mediante la aproximación de Caputo para la derivada de orden α como se muestra en Ec. (5) [13]:

$$\frac{d^\alpha u}{dt^\alpha} = \frac{1}{\Gamma(2-\alpha)h} \sum_k b_k (u_{i+1-k} - u_{i-k}) \quad (5)$$

Así, el lado derecho de Ec. (5) incluye información de la historia de la variable u . Donde h es el paso de discretización temporal y b_k , son pesos a determinarse mediante:

$$b_k = (k+1)^{1-\alpha} - k^{1-\alpha} \quad (6)$$

donde k es un contador y Γ es la función gamma de Euler.

La Ec. (5) se aplicó a cada una de las ecuaciones diferenciales de Ec. (1) a Ec. (4), obteniendo un sistema de ecuaciones algebraicas a resolver por el método de Euler en un algoritmo en Matlab.

4. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

El MDF previamente mostrado cuenta con 8 parámetros, los que incluyen el α , 4 parámetros cinéticos y 3 rendimientos. Se optó por fijar los siguientes parámetros: $K_S=1.67$ g/L , $P_{E,\max}=56$ g/L , $I=4.5$. Esto de acuerdo con el estudio cinético realizado por [12] para la fermentación de xilosa con *P. stipitis*. Magnitudes que también se emplearon en [9] para modelar sus datos experimentales.

Por otro lado, los rendimientos para la biomasa y los productos se calcularon teóricamente como:

$$Y_{X/S} = \frac{X_F - X_0}{S_0 - S_F} \quad (7)$$

$$Y_{P_i/S} = \frac{P_{i,F} - P_{i,0}}{S_0 - S_F} \quad \text{con } i = X, E \quad (8)$$

Solo α y $\mu_{\max}$, se estimaron mediante un análisis de regresión paramétrica que minimiza la solución numérica del modelo con los datos experimentales. Este paso se efectuó en un código en Matlab mediante la función *lsqcurvefit* que usa el algoritmo de Levenberg-Marquard, expresada como:

$$\mathbf{P}_{n+1} = \mathbf{P}_n - (\mathbf{H}(\mathbf{P}_n) + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{r} \quad (9)$$



$$\mathbf{r} = \mathbf{y}_{\text{exp}} - \mathbf{y}_{\text{modelo}} \quad (10)$$

Donde $\mathbf{P}_n$ es el vector de parámetros a estimar en la iteración n . $\mathbf{H}$ es la matriz Hessiana que depende de $\mathbf{P}_n$. $\mathbf{I}$ y $\mathbf{J}$ son la matriz identidad y jacobiana, respectivamente. $\mathbf{r}$ es el vector de residuos entre los datos experimentales y el modelo. λ es un parámetro de amortiguamiento con $\lambda > 0$.

5. RESULTADOS

5.1. Caso 1: Producción de xilitol

Las estimaciones paramétricas para α y $\mu_{\max}$, así como los rendimientos calculados del MDF aplicado a la producción de xilitol se resumen en la Tabla 1. $\mu_{\max}$ mostró valores consistentes con otros reportes [9,12] para la fermentación de xilosa en condiciones microaeróbicas. Con base en el rendimiento Y_{PXS} se observó que a 30°C y 100 rpm fue la mejor condición para la producción de xilitol. Pero cuando la agitación se elevó de 100rpm a 150rpm se apreció parcial formación de etanol, así como el crecimiento de biomasa.

TABLA 1. Parámetros estimados (95% confianza) y rendimientos calculados para la producción de xilitol

T °C	A rpm	α	$\mu_{\max}$ (h ⁻¹)	Y_{XS}	Y_{PXS}	$Y_{PE/S}$
30	100	0.449±0.001	0.134±6E-4	0.13	0.78	0.02
	150	0.731±0.029	0.045±0.005	0.24	0.46	0.31
	200	0.955±0.040	0.020±0.002	0.19	0.71	1E-3
35	100	0.451±0.026	0.160±0.015	0.15	0.40	0.01
	150	0.492±0.007	0.138±0.003	0.13	0.56	0.08
	200	0.731±0.042	0.054±8E-4	0.12	0.56	0.16
40	100	0.340±0.020	0.241±0.027	0.20	0.56	0.17
	150	0.542±0.026	0.110±0.010	0.25	0.75	0.23
	200	0.329±0.039	0.259±0.039	0.22	0.66	1E-4

De acuerdo con [8] la afinidad dual de la enzima xilosa reductasa presente en *P. stipitis* conduce a la formación de xilitol bajo condiciones limitadas de oxígeno. En consecuencia, un incremento en la agitación promueve la transferencia de masa de oxígeno ($K_L a$), favorece la asimilación de sustratos para crecimiento de biomasa. Pero y reduce la producción de xilitol. Comportamientos que coinciden con otros estudios [18,11].

Por otro lado, el efecto de la temperatura sobre $\mu_{\max}$ pareció indicar una aceleración en el crecimiento microbiana para una misma velocidad de agitación. Sin embargo, la influencia sobre producción de xilitol no clara. De acuerdo con [19] una temperatura de 26-30°C favorece la acumulación de

etanol, mientras que un incremento en la acumulación de xilitol se observó en un intervalo de 30-35°C.

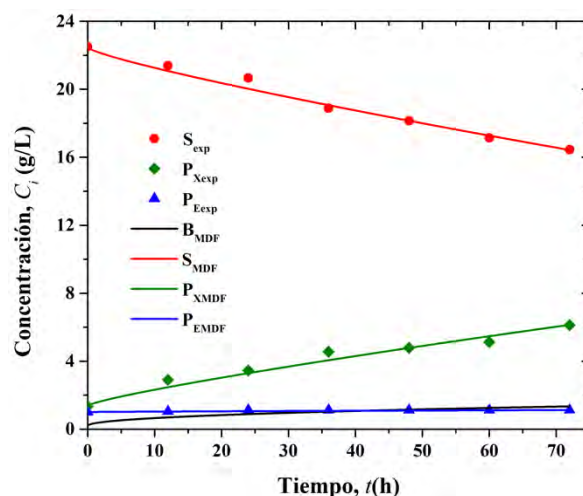


FIGURA 2. Solución numérica del MDF para la producción experimental de xilitol a 30°C y 100rpm.

5.1.1. Influencia de la agitación sobre α

A partir del ajuste paramétrico se observó que la incorporación de α mejoró la representación de los datos experimentales con respecto al enfoque convencional de orden entero. Los coeficientes de determinación promedio R^2 de la aplicación del modelo a los 9 casos experimentales fueron 0.97, 0.83, 0.77 para el sustrato, xilitol y etanol, respectivamente. Esto permitió la apropiada representación de las variables mediante el MDF como se ejemplifica en la Figura 2 para la producción de xilitol a 30°C y 100rpm. De acuerdo con la Tabla 1. α mostró magnitudes inferiores a la unidad en todos los casos. En la literatura, este parámetro se ha asociado a la dinámica más “rápida” o “lenta” de las variables con el tiempo, como la súper-difusión y sub-difusión temporal en el transporte de masa [13]. Aunque en este estudio, los fenómenos de transporte no se han incluido explícitamente en el MDF, parece que α sí presenta una correspondencia directa con la velocidad de agitación. Ya que, en la mayoría de los casos, a T constante, el exponente aumentó con la elevación de la agitación. Esto podría significar que los gradientes de concentración se reducen y favorecen la calidad de mezclado en el reactor, aumentando la dinámica de las variables claves del proceso.

5.2. Caso de estudio 2: producción de etanol

Los parámetros del MDF se resumen en la Tabla 2 para las diferentes condiciones de operación de la producción de

etanol. El estudio desarrollado por [9] consistió en 8 experimentos que fueron modelados obteniendo coeficientes de determinación R^2 promedio de 0.83, 0.95 y 0.92 para biomasa, xilosa y etanol, respectivamente. Sin embargo, los resultados de este estudio mejoran ligeramente ya que se obtuvieron coeficientes R^2 promedios de 0.92, 0.99 y 0.97 para la biomasa, xilosa y etanol, respectivamente. En la Figura 3, se muestra la comparación del MDF contra datos experimentales para la producción de etanol a 0.1vvm con $X_0=1.5\text{g/L}^{-1}$.

TABLA 2. Parámetros estimados (95% confianza) y rendimientos calculados del MDF para la producción de etanol.

X_0 g/L^{-1}	Ai vvm	α	$\mu_{\max}$ (h^{-1})	$Y_{X/S}$	$Y_{PE/S}$
0.3	0	0.973 ± 0.007	$0.012 \pm 4\text{E-}4$	0.075	0.343
	0.1	1.099 ± 0.004	$0.017 \pm 3\text{E-}4$	0.121	0.392
	0.2	0.905 ± 0.039	0.030 ± 0.004	0.122	0.339
1.5	0	0.968 ± 0.058	0.018 ± 0.003	0.093	0.445
	0.1	1.025 ± 0.007	0.066 ± 0.001	0.114	0.443
	0.2	0.894 ± 0.002	$0.059 \pm 4\text{E-}4$	0.132	0.396
3.0	0	1.003 ± 0.029	0.018 ± 0.001	0.133	0.456
	0.1	1.399 ± 0.029	0.112 ± 0.002	0.205	0.418

Para este caso, las magnitudes de $\mu_{\max}$ no solo fueron equivalentes al caso 1, sino también a los reportados en [9]. Mientras que los rendimientos $Y_{PE/S}$ fueron similares a los reportados por [11] quienes estudiaron la producción de etanol en medio sintético de xilosa/glucosa con agitaciones de 150 a 250rpm y Ai de 0.25 a 0.75vvm. Además, ambos rendimientos mostraron concordancia con [20] quienes evidenciaron que incrementos de 0.1vvm-1vvm reducen los $Y_{PE/S}$, pero incrementan los $Y_{B/S}$. Estos trabajos indican que con $Ai=0.1\text{vvm}$ es posible mantener condiciones limitadas de oxígeno que favorecen la acumulación de etanol. Sin embargo, incrementar $Ai>0.1\text{vvm}$ si bien promueve el crecimiento de biomasa, compromete la generación de producto. En cambio, el incremento de biomasa inicial para una misma velocidad de aireación indicó un aumento en la velocidad de crecimiento, así como los rendimientos. De acuerdo con los discutido en [9] este incremento reduce la fase lag y el tiempo de conversión.

5.2.1. Funcionalidad de parámetros del modelo

Debido a la homogeneidad observada en los parámetros de la Tabla 2 para el estudio de la producción de etanol, se evaluó la dependencia de éstos en función de las condiciones de operación. La figura 4, es un ejemplo que refleja la dependencia del rendimiento $Y_{PE/S}$ con respecto a la X_0 y Ai , lo que muestra que pueden existir condiciones de producción mejores que las evaluadas experimentalmente.

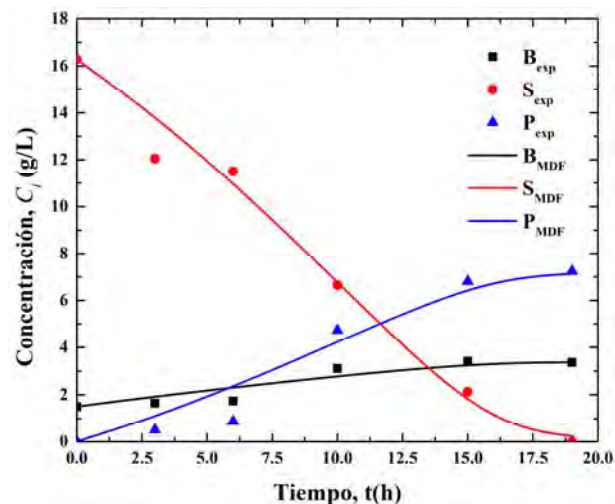


FIGURA 3. Solución numérica del MDF para la producción experimental de etanol con $X_0=1.5\text{g/L}^{-1}$ y 0.1 vvm reportada en [9].

Este análisis permitió proponer polinomios multivariantes de segundo orden de la forma:

$$p_n(X_0, Ai) = a_0 X_0^2 + a_1 Ai^2 + a_2 X_0 \cdot Ai + a_3 X_0 + a_4 Ai + a_5 \quad (11)$$

Los coeficientes del polinomio correspondientes a α , $\mu_{\max}$, $Y_{X/S}$ y $Y_{PE/S}$ se resumen en la Tabla 3. Es notable que algunos coeficientes fueron 0, ya que algunas interacciones no fueron importantes en los parámetros. Así mismo, las funciones propuestas obtuvieron coeficientes de determinación altos ($R^2>0.77$) al representar los parámetros de la Tabla 2. Esta generalización de parámetros en adición con el MDF permite la evaluación de nuevas condiciones de operación no abordadas experimentalmente.

TABLA 3. Coeficientes del polinomio Ec. (11) para la funcionalidad de parámetros del MDF a condiciones diferentes de X_0 y Ai

a_i	α	$\mu_{\max}(\text{h}^{-1})$	$Y_{X/S}$	$Y_{PE/S}$
a_0	0.020	0	0.0138	-0.028
a_1	-20.735	-1.722	-2.160	-3.429
a_2	0	0.251	0	-0.242
a_3	0	0	-0.019	0.134
a_4	4.0075	0.260	0.679	0.763
a_5	0.9034	0.016	0.079	0.309
R^2	0.77	0.89	0.93	0.97
$p\text{-val}$	0.08	0.019	0.04	0.038

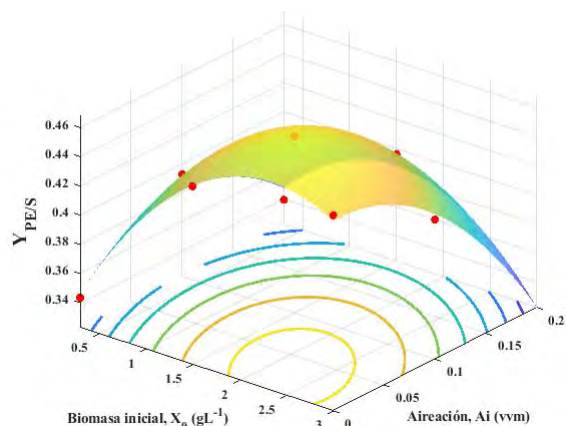


FIGURA 4. Evaluación de la dependencia de $Y_{PE/S}$ con respecto a X_0 y A_i evaluada por el polinomio Ec. (11) y los coeficientes de la Tabla 2.

5.2.1. Influencia de la aireación sobre α

La incorporación de α al MDF para la producción de etanol mostró correlación con el aumento en A_i en el intervalo de 0 a 0.1 vvm. Esto no solo se observó en los valores de la Tabla 2, sino también su función evaluada por Ec. (11) que muestra en la Figura 5. Si bien en la sección 5.1.1 se indicó que α es sensible a la agitación (y en consecuencia a la calidad de mezclado), debe recordarse que en este caso de estudio la velocidad de agitación se mantuvo a 200rpm. Esto podría explicar la similitud entre los valores de α en la Tabla 2 a diferencia de los de la Tabla 1. No obstante, el incremento en α al pasar de la condición anaeróbica a 0.1 vvm podría asociarse a la reducción en la fase lag mencionada en [9]. Que agiliza la dinámica de las variables durante las primeras horas de fermentación. Ya que el aumento de A_i mejora la transferencia de masa líquido-gas de oxígeno (K_La), que da lugar al crecimiento de biomasa y el aumento de Y_{XS} [18,11,20]. Estos resultados son interesantes ya que incorporan al modelo matemático de nuevos efectos dinámicos sobre las de variables en procesos de fermentación. Los cuales podrían aportar información indirecta sobre fenómenos de agitación, mezclado o transporte de masa bajo un enfoque novedoso.

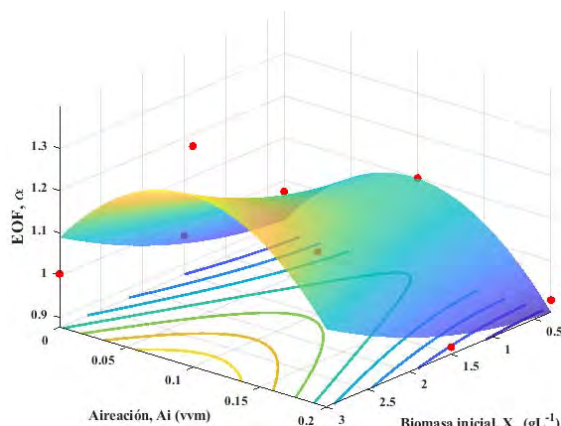


FIGURA 5. Evaluación de α a diferentes condiciones de X_0 y A_i mediante el polinomio Ec. (11) y los coeficientes de la Tabla 3.

6. CONCLUSIONES

En este estudio un modelo dinámico fraccional fue exitosamente evaluado para estudiar la producción de xilitol y etanol usando *Pichia stipitis* suspendida a diferentes condiciones de operación. El modelo propuesto incluye la dinámica fraccional de orden α , así como la limitación de sustrato en términos de la cinética de Monod modificada. Los resultados muestran que el MDF mejora la descripción de mediciones experimentales con respecto al enfoque tradicional. En particular, se observó que α fue sensible a la agitación y la aireación en ambos casos de estudio, demostrando que no solo es un parámetro de ajuste si no que podría aportar información concerniente a el transporte de masa de nutrientes y la calidad de mezclado, lo que permite incluir otros efectos dinámicos sobre las variables del proceso. La generalidad del modelo podría contribuir en el estudio y optimización de condiciones no previstas experimentalmente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la I.Q. Rubí Yesenia Bautista Ortega por permitir el uso de la información experimental empleados para el caso de estudio en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1]. Carrillo-Nieves, D., Saldarriaga-Hernandez, S., Gutiérrez-Soto, G., Rostro-Alanis, M., Hernández-Luna, C., Alvarez, A. J., ... & Parra-Saldívar, R. *Biotransformation of agro-industrial waste to produce lignocellulolytic enzymes and bioethanol with a zero*



- waste. *Biomass Conversion and Biorefinery* 12: 253-264 (2022).
- [2]. Romero-García, J. M., Fehér, C., Cara, C., Ruiz-Ramos, E., & Castro, E. *Improved xylitol production from olive stones hydrolysates by biological detoxification*. *Journal of Cleaner Production* 336: (2022).
- [3]. Espinoza-Acosta, J. L. *Biotechnological production of xylitol from agricultural waste*. *Biotecnia* 22: 126-134 (2020).
- [4]. Felipe Hernández-Pérez, A., de Arruda, P. V., Sene, L., da Silva, S. S., Kumar Chandel, A., & de Almeida Felipe, M. D. G. *Xylitol bioproduction: state-of-the-art, industrial paradigm shift, and opportunities for integrated biorefineries*. *Critical Reviews in Biotechnology* 39: 924-943 (2019).
- [5]. Arcaño, Y. D., García, O. D. V., Mandelli, D., Carvalho, W. A., & Pontes, L. A. M. *Xylitol: A review on the progress and challenges of its production by chemical route*. *Catalysis Today* 344: 2-14 (2020).
- [6]. Niphadkar, S., Bagade, P., & Ahmed, S. *Bioethanol production: insight into past, present and future perspectives*. *Biofuels* 9: 229-238 (2018).
- [7]. Aditiya, H. B., Mahlia, T. M. I., Chong, W. T., Nur, H., & Sebayang, A. H. *Second generation bioethanol production: A critical review*. *Renewable and sustainable energy reviews* 66: 631-653 (2016).
- [8]. Liang, M., Damiani, A., He, Q. P., & Wang, J. *Elucidating Xylose Metabolism of Scheffersomyces stipitis for Lignocellulosic Ethanol Production*. *ACS Sustainable Chemistry Engineering* 2: 38-48 (2014).
- [9]. Nosrati-Ghods, N., Harrison, S. T., Isafiade, A. J., & Tai, S. L. *Analysis of ethanol production from xylose using Pichia stipitis in microaerobic conditions through experimental observations and kinetic modelling*. *Biochemical Engineering Journal*, 164, 107754.
- [10]. Silva, J. P. A., Mussatto, S. I., Roberto, I. C., & Teixeira, J. A. *Ethanol production from xylose by Pichia stipitis NRRL Y-7124 in a stirred tank bioreactor*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 28: 151-156 (2011).
- [11]. Nosrati-Ghods, N., Harrison, S. T., Isafiade, A. J., & Leng Tai, S. *Mathematical modelling of bioethanol fermentation from glucose, xylose or their combination—a review*. *ChemBioEng Reviews* 7: 68-88 (2020).
- [12]. Farias, D., de Andrade, R. R., & Maugeri-Filho, F. *Kinetic modeling of ethanol production by Scheffersomyces stipitis from xylose*. *Applied biochemistry and biotechnology*, 172: 361-379 (2014).
- [13]. Sun, Z. Z., & Gao, G. H. *Finite difference methods for fractional differential equations*. Press of Science, Beijing (2015).
- [14]. Toledo-Hernandez, R., Rico-Ramirez, V., Iglesias-Silva, G. A., & Diwekar, U. M. *A fractional calculus approach to the dynamic optimization of biological reactive systems. Part I: Fractional models for biological reactions*. *Chemical Engineering Science* 117: 217-228 (2014).
- [15]. Alqahtani, R. T., Yusuf, A., & Agarwal, R. P. *Mathematical analysis of oxygen uptake rate in continuous process under caputo derivative*. *Mathematics* 9: 675 (2021).
- [16]. Melgarejo-Torres, R., Rosales-Mercado, D., Polo-Labarríos, M. A., Fernández-Anaya, G., Morales-Ibarria, M., Pérez-Vega, S. B., ... & Palmerín-Carreño, D. M. *Modelo matemático para estimar el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno en biorreactores usando cálculo conformal*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 21:18 (2022).
- [17]. Bautista-Ortega, R. Y. *Determinación de las condiciones de fermentación para la producción de xilitol a partir de un hidrolizado de los residuos de la planta de plátano*, 2019.
- [18]. Silva, J. P. A., Mussatto, S. I., Roberto, I. C., & Teixeira, J. A. *Fermentation medium and oxygen transfer conditions that maximize the xylose conversion to ethanol by Pichia stipitis*. *Renewable Energy* 37: 259-265 (2012).
- [19]. Slininger, P. J., Bothast, R. J., Ladisch, M., & Okos, M. R. *Optimum pH and temperature conditions for xylose fermentation by Pichia stipitis*. *Biotechnology and Bioengineering*, 35: 727-731 (1990).
- [20]. Unrean, P., & Nguyen, N. H. *Metabolic pathway analysis of Scheffersomyces (Pichia) stipitis: effect of oxygen availability on ethanol synthesis and flux distributions*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94: 1387-1398 (2012).





Análisis térmico de una torre de enfriamiento

ARTURO REYES LEON¹, PEDRO QUINTO DIEZ², CARLOS ROGELIO TAPIA MEDINA¹,
FERNANDO ARAGON RIVERA¹, GABRIELA MATURANO GÓMEZ¹, LUIS FERNANDO
GARCÍA JIMÉNEZ¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Energía, CDMX, 02120, México

²Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME Zacatenco, U. P. Adolfo López Mateos, CDMX, 07738, México

Autor de Correspondencia: Arturo Reyes León (e-mail: arthuro_reyes@yahoo.com.mx).

RESUMEN Este estudio tiene como objetivo analizar por medio de la primera ley y segunda ley de la termodinámica el desempeño de una torre de enfriamiento de una central termoeléctrica. Este análisis se realiza utilizando ecuaciones de balance de masa, energía, entropía, exergía, eficiencia energética y exergética, este fue aplicado a las condiciones de operación de la torre de enfriamiento, por otra parte, se analizó la influencia que tiene la variación de la humedad relativa de salida de la torre de enfriamiento sobre el desempeño de esta, provocando una disminución de la eficiencia energética y el aumento de la temperatura de salida del agua de enfriamiento. Los resultados muestran que la torre de enfriamiento tiene una eficiencia energética de 46.6%, una eficiencia exergética de 94.9% y una destrucción de exergía de 15.49 MW. Mientras que la variación de la humedad relativa de salida entre los valores de 70% y 100%, muestran que la eficiencia energética varía de 42.38 % a 57.35% y la mayor destrucción de exergía ocurre con una humedad relativa del 100% siendo esta de 17.27 MW, la eficiencia exergética varía de 95.53 % a 94%. El software EES (Engineering Equation Solver) se utiliza para realizar el análisis.

PALABRAS CLAVE: Torre de Enfriamiento, Análisis de Exergía, Eficiencia Energética, Eficiencia Exergética.

1. INTRODUCCIÓN

Las torres de enfriamiento son dispositivos fundamentales en una amplia variedad de procesos industriales, ya que permiten la disipación eficiente del calor residual generado durante diversas operaciones térmicas. Estos sistemas funcionan como intercambiadores de calor, transfiriendo energía térmica desde el agua caliente hacia el aire, mediante mecanismos de convección y evaporación. Este proceso

puede desarrollarse tanto por contacto directo como indirecto entre el agua y el aire, dependiendo del tipo de torre utilizada. En las torres de tiro abierto, por ejemplo, el agua caliente entra en contacto directo con el aire ambiente, lo que provoca una pérdida de calor sensible y latente, generando un enfriamiento efectivo a través de la evaporación. Aproximadamente el 1 a 2% del flujo de agua circulante se evapora durante el proceso, lo que representa una pérdida térmica significativa [1,2].

Las torres de enfriamiento son ampliamente empleadas en centrales termoeléctricas, plantas petroquímicas, sistemas de climatización de grandes edificios, refinerías, generación de energía eléctrica y otras instalaciones industriales que requieren una regulación constante de temperatura en sus procesos. De acuerdo con su configuración, las torres pueden clasificarse en varios tipos: de tiro natural o mecánico (según el tipo de ventilación), y de contraflujo o flujo cruzado (según la dirección relativa entre el flujo de aire y el flujo de agua). Cada tipo tiene características específicas de diseño que influyen en su eficiencia térmica y en su adaptación a diferentes condiciones ambientales y operativas de la industria [3].

El análisis del rendimiento térmico de las torres de enfriamiento ha sido objeto de estudio desde principios del siglo XX, y a lo largo de las décadas se han desarrollado numerosos modelos teóricos y empíricos para evaluar su comportamiento. En estos estudios, se reconoce que la transferencia simultánea de calor y masa entre el agua y el aire es un fenómeno complejo, influenciado por variables como la temperatura, la humedad relativa del aire, la velocidad del viento, la geometría de la torre [4,5].

En particular, las torres de enfriamiento desempeñan un papel crítico en las centrales termoeléctricas, ya que se encargan de enfriar el agua procedente del condensador, permitiendo su reutilización en el ciclo Rankine. La eficiencia del sistema depende en gran medida de la efectividad con la que se reduce la temperatura del agua, lo cual se logra mediante el aumento del área de contacto entre



el agua caliente y el aire ambiente. Para ello, se utilizan empaquetado o "packing", que consisten en estructuras diseñadas para maximizar la superficie de contacto y prolongar el tiempo de residencia del agua dentro de la torre, incrementando así la transferencia de masa y calor [6].

Dada la importancia de estos factores, el presente trabajo se llevó a cabo con el propósito de identificar y cuantificar los parámetros que tienen mayor influencia en el comportamiento térmico de una torre de enfriamiento. En particular, se analizó una torre perteneciente a una central termoeléctrica de ciclo híbrido, aplicando los principios de la primera y segunda ley de la termodinámica. Para ello, se utilizó el software **Engineering Equation Solver (EES)**, herramienta que permite modelar con precisión sistemas térmicos complejos mediante el uso de ecuaciones diferenciales y balances de energía y entropía. Este enfoque permitió no solo evaluar la eficiencia térmica del sistema, sino también estimar su irreversibilidad y proponer posibles mejoras operativas.

1.1. Caso de estudio.

La torre de enfriamiento analizada está instalada en la central de Ciclo Híbrido. que representa la operación de las unidades 4, 5, 6 y 7, corresponde a un ciclo de vapor regenerativo con recalentamiento y tres turbinas de gas simples acopladas con su correspondiente recuperador de calor.

La torre de enfriamiento analizada es una torre de tipo húmedo, de tiro inducido y flujo cruzado, la cual tiene la función de enfriar el agua que retorna del condensador. Esta torre dispone de 10 ventiladores de tiro inducido, que tienen la función de genera una corriente de aire por el interior de la torre, induciendo aire del medio ambiente con un menor contenido de humedad, estableciendo un flujo que entra en contacto con el agua que desciende a través del relleno de la torre, hasta descender a la pileta de descarga y se bombea nuevamente (mediante una bomba) al condensador de vapor.

El esquema general de la torre de enfriamiento de tipo húmedo analizada, junto con las líneas de cada corriente de fluido (agua y aire), necesarios para el análisis térmico, se presenta en la Figura. 1.

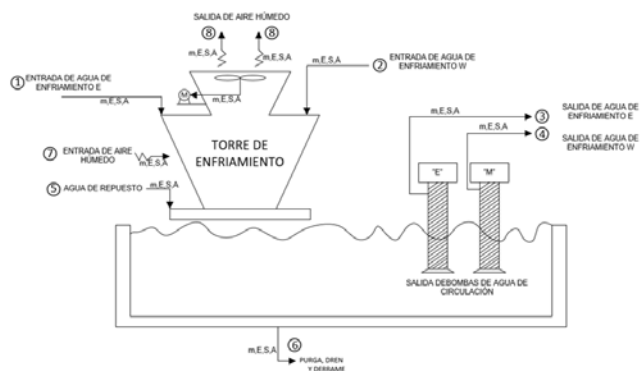


FIGURA 1. Esquema de torre de enfriamiento con sus líneas de corriente necesarias para el análisis

2. METODOLOGIA

En esta sección se describe la metodología desarrollada para evaluar el análisis térmico de una torre de enfriamiento. La metodología inicia con las consideraciones e hipótesis tomadas para la realización de este estudio, para continuar con el análisis de la primera ley de la termodinámica (balance de masa y energía) siguiendo con el análisis de segunda ley de la termodinámica (balance de entropía y balance de exergía) y finalmente las eficiencias de energética y exergética.

2.1. Consideraciones

Para el análisis térmico de la torre de enfriamiento de contraflujo donde el agua desciende mientras el aire asciende se tomaron las siguientes consideraciones e hipótesis: [7,8,9]

- Opera en modo permanente.
- La transferencia de calor con el medio ambiente es despreciable.
- La transferencia de calor entre el ventilador de la torre y el agua es ignorada.
- El calor específico del aire y el agua permanece constante.
- Los coeficientes de transferencia de masa y calor en toda la sección de la torre permanecen constantes.
- Las pérdidas de agua por arrastre del aire son ignoradas.
- Las temperaturas de agua y el aire son uniformes en cualquier sección de la torre de enfriamiento.



2.2. Análisis de primera ley de la termodinámica

El análisis de primera ley de la termodinámica y de la conservación de la energía describe la relación entre las diferentes formas de energía y como interactúan entre sí. La energía no se crea ni se destruye durante un proceso, solo puede cambiar de una forma a otra, por lo que cada componente de la energía se debe ser calculado y ser considerado en cada proceso. Por lo que el análisis de primera ley se puede definir como la diferencia entre las cantidades de entrada y salida.

Para un volumen de control en estado estacionario y considerando las variaciones de la energía potencial y cinética insignificantes, el balance de masa y el balance de energía pueden representarse de la manera siguiente:

$$\sum_e \dot{m} = \sum_s \dot{m} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (2)$$

Aplicando las ecuaciones (1) y (2) a la torre de enfriamiento de la Figura 1 se tiene:

$$\dot{m}_{ageE} + \dot{m}_{ageW} + \dot{m}_{ag5} + \dot{m}_{ase}\omega_e + \dot{m}_{ase} = \dot{m}_{agsE} + \dot{m}_{agsW} + \dot{m}_{ag6} + \dot{m}_{ass}\omega_s + \dot{m}_{ass}f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{ageE}(h_{ageE} - h_{agsE}) + \dot{m}_{ageW}(h_{ageW} - h_{agsW}) + \dot{m}_{ag5}h_{ag5} + \dot{m}_{as}[(\omega_e h_{ve} - \omega_s h_{vs}) + (h_{ase} - h_{ass})] - \dot{m}_{ag6}h_{ag6} = 0 \quad (4)$$

Ec. (1) y (2): Representan los principios generales de conservación de masa y energía para un volumen de control en estado estacionario (sin acumulación). Ec. (3) y (4): Aplicación directa a la torre: (3) establece que la diferencia entre el flujo másico de agua fría de salida (corriente 2) y caliente de entrada (corriente 1) se debe al agua evaporada (corriente 8, vapor), y a los flujos de reposición y purga (Tabla 2).

Ec. (4) representa el balance de energía total (entalpías $\times$ flujos másicos) entre entradas (agua caliente, aire húmedo, agua de reposición) y salidas (agua fría, aire húmedo saturado, vapor evaporado, purga). Los valores numéricos se obtienen usando propiedades termodinámicas del agua y aire húmedo (Tabla 3).

2.3. Análisis de segunda ley de la termodinámica

La exergía se define como el trabajo máximo teórico que un sistema puede producir a las condiciones de estado del referencia [8]. La ecuación general del balance de exergía se forma a partir del análisis de la primera y la segunda ley de la termodinámica [11].

Para un volumen de control en estado permanente el balance de exergía se expresa por la ecuación siguiente [12].

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e a_{fe} - \sum_s \dot{m}_s a_{fs} - \dot{A}_d = 0 f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (5)$$

La Ec. (5): Es Balance general de exergía $\sum A_{entrada} - \sum A_{salida} - A_d = 0$ Donde: $A_{entrada}$: es la exergía suministrada (ej. agua caliente, aire seco + humedad, agua de reposición); A_{salida} : es la exergía que sale del sistema (agua enfriada, aire húmedo, vapor, purga) y A_d exergía destruida (irreversibilidades internas: fricción, mezcla irreversible, transferencia de calor con gradiente finito), calculada como diferencia entre exergía entrante y saliente.

La exergía es generada por medio de las irreversibilidad del sistema. La exergía también revela las debilidades termodinámicas [9,10]. La exergía está formada por la exergía física, química, potencial y cinética [8,11]. La exergía física es provocada por las desviaciones de la temperatura y la presión del sistema con respecto a las del estado referencia o medio ambiente. La exergía química se debe a la desviación de la composición química del sistema con respecto a la del entorno. La exergía cinética se debe a la velocidad del sistema medida con respecto al estado de referencia [11,12]. La exergía potencial se debe a la altura del sistema medida con respecto al estado referencia. Por lo que la exergía total se expresa por la ecuación siguiente [12].

$$A_t = A_c + A_p + A_f + A_q f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (6)$$

Ec. (6)–(8): Descomposición de la exergía específica total (A) en componentes física y química (cinética y potencial despreciables). En este caso:

Exergía física (A_f): asociada a desequilibrios de temperatura y presión respecto al ambiente ($T_0=298$ K, $p_0=78$ kPa); calculada con (9)–(11). Exergía química (A_q): asociada a la diferencia de potencial químico del vapor de agua en el aire húmedo respecto al ambiente (usando fracción molar y presión parcial, Ec. (16)–(17)).





Sin embargo, en este estudio, la exergía potencial y la cinética son insignificantes debido a que son demasiado pequeñas para ser consideradas, la exergía total se expresa por la ecuación siguiente:

$$A_t = A_f + A_q f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (7)$$

Considerando solo la exergía específica total, esta queda como:

$$a_t = a_f + a_q \quad (8)$$

Donde

$$a_f = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (9)$$

$$a_q = \frac{1}{M} \left\{ \left[g_{H_2O(l)} - g_{H_2O(g)} \right] + \frac{RT_0}{y_{H_2O}^a} \ln \left(\frac{1}{y_{H_2O}^a} \right) \right\} \quad (10)$$

$$y_{H_2O}^a = \frac{P_{ve}}{P_{ref}} \quad (11)$$

Aplicando el balance exergético a la torre de enfriamiento de la Figura 1 se obtiene la expresión siguiente.

$$\sum \dot{A}_e - \sum \dot{A}_s - \dot{A}_d = 0 \quad (12)$$

$$\sum \dot{m}_e a_{te} - \sum \dot{m}_s a_{ts} - \dot{A}_d = 0 \quad (13)$$

$$\dot{m}_{ageE} a_{tageE} + \dot{m}_{ageW} a_{tageW} + \dot{m}_{ag5} a_{ag5} + \dot{m}_{ve} a_{tve} + \dot{m}_{ase} a_{tase} - [\dot{m}_{agsE} a_{tagsE} + \dot{m}_{agsW} a_{tagsW} + \dot{m}_{vs} a_{tvs} - \dot{m}_{ass} a_{tass}] - \dot{A}_d = 0 \quad (14)$$

En la ecuación (13), la exergía específica total es la suma de la exergía física y de la química. Con esta consideración el balance de exergía se expresa con la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{ageE} [(a_{fageE} + a_{qageE}) - (a_{fagsE} + a_{qagsE})] + \\ & \dot{m}_{ageW} [(a_{fageW} + a_{qageW}) - (a_{fagsW} + a_{qagsW})] + \\ & \dot{m}_{ag5} (a_{fag5} + a_{qag5}) + \dot{m}_{as} (a_{fe} - a_{fs}) + \dot{m}_{ve} (a_{fve} + a_{qve}) - \\ & \dot{m}_{ag6} (a_{fag6} + a_{qag6}) - \dot{m}_{vs} (a_{fvs} + a_{qvs}) = \dot{A}_d \end{aligned} \quad (15)$$

Donde para el aire seco se tiene[17]:

$$(a_{fe} - a_{fs}) = h_{ase} - h_{ass} - T_0(s_{ase} - s_{ass}) \quad (16)$$

$$(s_{ase} - s_{ass}) = C_{pas} \ln \frac{T_{ase}}{T_{ass}} - R_{as} \ln \frac{P_{ase}}{P_{ass}} \quad (17)$$

Ec. (12)–(15): Aplicación del balance general a la torre (Figura 1), donde se considera explícitamente: Exergía de entrada: corrientes 1 (agua caliente), 5 (agua de reposición), 7 (aire + vapor). Exergía de salida: corrientes 2 (agua fría), 6 (purga), 8 (aire húmedo + vapor evaporado).

2.3. Eficiencia energética

La eficiencia energética es una medida del desempeño de una máquina térmica, y es la fracción del calor de entrada que es convertido a la salida en el trabajo neto [15,10]. Para las máquinas térmicas la salida deseada es el trabajo neto, mientras que la entrada que se requiere es la cantidad de calor suministrado al fluido. En términos generales, la eficiencia energética se expresa como la relación entre la salida deseada entre la entrada requerida, quedando así:

$$\eta_I = \frac{\text{Salida Deseada}}{\text{Entrada Requerida}} \quad (18)$$

La eficiencia energética de la Torre de Enfriamiento se define como la relación entre la transferencia real de energía y la máxima transferencia de energía posible.

$$\eta_I = \frac{\dot{Q}_{ag}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\dot{m}_{ag} C_{p,ag} \Delta T_{ag}}{q_{t,min}(T_{ag,e} - T_{bh})} \quad (19)$$

Donde T_{bh} es igual a la temperatura de bulbo húmedo de la Torre de Enfriamiento, por lo que la ecuación (19), se escribe como:

$$\eta_I = \frac{\dot{Q}_{ag}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{\dot{m}_{ag} C_{p,ag} \Delta T_{ag}}{q_{t,min}(T_{ag,e} - T_{bh})} \quad (20)$$

Por otra parte, la eficiencia energética para una Torre de Enfriamiento se obtiene de la siguiente expresión: [8,9]

$$\eta_I = \frac{T_{ag,e} - T_{ag,s}}{T_{ag,e} - T_{bh}} \quad (21)$$



Partiendo de la ecuación (21) la eficiencia energética para la Torre de Enfriamiento de la Figura 1 es:

$$\eta_I = \frac{\left(\frac{T_{ageE1} + T_{ageW2}}{2}\right) - \left(\frac{T_{agsE3} + T_{agsW4}}{2}\right)}{\left(\frac{T_{ageE1} + T_{ageW2}}{2}\right) - T_{bhe}} \quad (22)$$

Ec. 22, La eficiencia energética también dada como $(T_{entrada,agua} - T_{salida,agua}) / (T_{entrada,agua} - T_{b,h,salida,agua})$ Mide cuán cerca está el enfriamiento del límite termodinámico (dado por la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada, $T_{b,h} = 287$ K).

2.4. Eficiencia exergética

La eficiencia de segunda ley, es la medida de las pérdidas por irreversibilidades que se dan en el proceso, y se expresa como [8, 9]:

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía suministrada}} \quad (23)$$

La eficiencia de segunda ley también puede ser expresada en términos de la destrucción de exergía y exergía suministrada, y se expresa por la siguiente ecuación:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{\Sigma A_{sum}} \quad (24)$$

Aplicado la ecuación (24) a la Torre de Enfriamiento de la Figura 1, la eficiencia de segunda ley se expresa como sigue:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{A_{ag,e} + A_{ag,r,e} - A_{ag,s}} \quad (25)$$

La eficiencia exergética mide la fracción de exergía total que entra al sistema que no se pierde por la irreversibilidad de los procesos que se efectúan en el sistema. Si el proceso fuera ideal, es decir sin destrucción de exergía (sin irreversibilidades), la eficiencia exergética sería del 100%.

Partiendo de la ecuación (25), la eficiencia exergética de la Torre de Enfriamiento de la Central Termoeléctrica es definida por la ecuación siguiente:

$$\eta_{II} = 1 - \frac{A_d}{A_{ageE} + A_{ageW} + A_{ags} - A_{agsE} - A_{agsW}} \quad (26)$$

3. RESULTADOS

Los cálculos se realizaron para las condiciones de operación de la torre de enfriamiento del ciclo híbrido. Los datos utilizados se muestran en la Tabla 1.

Corriente	Temperatura (K)	Presión (kPa)	Flujo másico (kg/s)	Humedad relativa (%)
1	319.5	132	3089	
2	318.5	132	3172	
3	299.5	191	3089	
4	299.5	196	3172	
5	287	78	-	
6	298	78	-	
Vapor				
7	298	78	-	
8	313	78	-	
Aire				
7	286	78	-	40
8	313	78	-	80

Los datos de operación se obtuvieron aplicando las normas y procedimientos necesarios, estos datos son utilizados para realizar el balance de masa, de primera ley y segunda ley de la termodinámica, finalmente las eficiencias energética y exergética aplicando las ecuaciones desarrolladas para la torre de enfriamiento y con la ayuda del software EES se obtuvieron las propiedades para cada corriente de la torre de enfriamiento. Los resultados se muestran en las tablas 2,3, 4 y 5 [13,14].

En la tabla 2 se muestran los flujos másicos de agua de repuesto, flujo de agua de purga, el flujo de vapor de entrada y salida, así como el flujo de aire seco.

Variable		Flujo masico (kg/s)
Agua de repuesto	$\dot{m}_{ag,r}$	236
Purga de agua	$\dot{m}_{ag,p}$	94
Vapor de entrada	$\dot{m}_{v,e}$	16
Vapor de salida	$\dot{m}_{v,s}$	158
Aire seco	$\dot{m}_{as}$	3094

En la Tabla 3 se muestran la entalpía específica para cada corriente de la torre de enfriamiento, la humedad específica del aire seco a la entrada y salida, los flujos de energía de cada corriente de la torre de enfriamiento.

En la Tabla 4 se muestra la entropía específica de cada corriente de la torre de enfriamiento y la generación de entropía del proceso de enfriamiento.

Tabla 3. Entalpía específica, humedad específica y flujos de energía para cada corriente de la torre de enfriamiento

Corriente	Entalpía específica h (kJ/kg)	Humedad específica ω (kgv/kgas)	Flujo de energía E (kW)
1	194.08	-	599558.17
2	189.19	-	600150.62
3	118.96	-	367508.88
4	118.96	-	377380.53
5	58.04	-	13691.30
6	118.96	-	11173.34
Vapor			
7	2526.21	-	39722.60
8	2573.54	-	405846.51
Aire			
7	287.12	0.00508	888355.02
8	313.41	0.05097	969696.81

Tabla 4. Entropía específica de la línea de corriente de la torre de enfriamiento y generación de entropía de torre de enfriamiento

Corriente	Entropía específica s (kJ/kg K)	Generación de entropía S_{gen} (kW/K)
1	0.6563	-
2	0.6410	-
3	0.4108	-
4	0.4108	-
5	0.2073	-
6	0.4108	-
Vapor		
7	8.8081	-
8	8.2557	-
Aire	0	
7	1.7345	
8	1.8457	
		28.91

En la tabla 5 se muestra las exergías físicas, exergías químicas y los flujos de exergía de cada corriente, la destrucción de exergía de cada corriente, los flujos de exergía. Así mismo se muestra la exergía destruida. Las condiciones de estado de referencia utilizadas para este estudio son $t_0 = 298$ K y $p_0 = 78$ kPa.

Tabla 5. Exergía física y química, flujos de exergía de las corrientes de la torre de enfriamiento y destrucción de exergía.

Corriente	Exergía física a_f (kJ/kg)	Exergía química a_q (kJ/kg)	Flujo de exergía A (kW)	Destrucción de exergía A_d (kW)
1	7.1844	175.46	564237.68	
2	6.6941	175.46	577838.12	
3	1.615	175.46	547033.37	

4	1.615	175.46	561727.21	
5	0	175.46	41809.05	
6	1.615	175.46	16631.41	
Vapor				
7	0.002	175.46	2342.30	
8	205.862	175.46	60134.58	
Aire				
7	0		0.00	
8	4.7814		14793.61	
				15494.19

En la Figura 2 se muestran las eficiencias energética y exergética de la torre de enfriamiento, estas eficiencias fueron obtenidas con las ecuaciones (22) y (26)

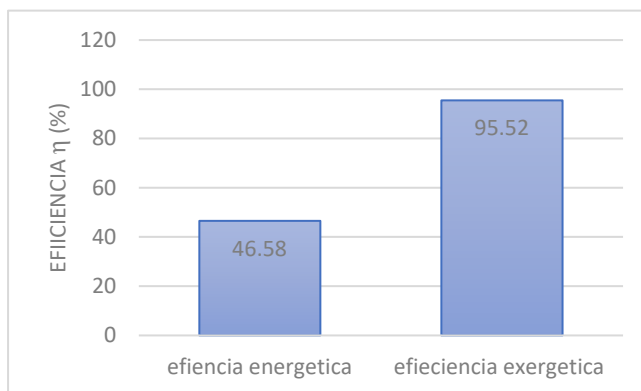


FIGURA 2. Eficiencias energética y exergética de la torre de enfriamiento.

Finalmente se realizó el estudio de la torre de enfriamiento manteniendo las condiciones de operación cuando la humedad específica se varía de 70 a 100 %.

En la Figura 3, se muestra la variación de la humedad específica. Donde se observa que esta varía de 0.4412 a 0.0606 kg_v/kg_{as}.

La Figura 4 muestra la destrucción de exergía para las humedades relativas de 70 a 100%, donde se observa que la mayor destrucción de exergía ocurre cuando la humedad relativa es de 100%, siendo esta de 17.26 MW y la menor es cuando esta es de 70%, siendo estas de 15.85 MW.

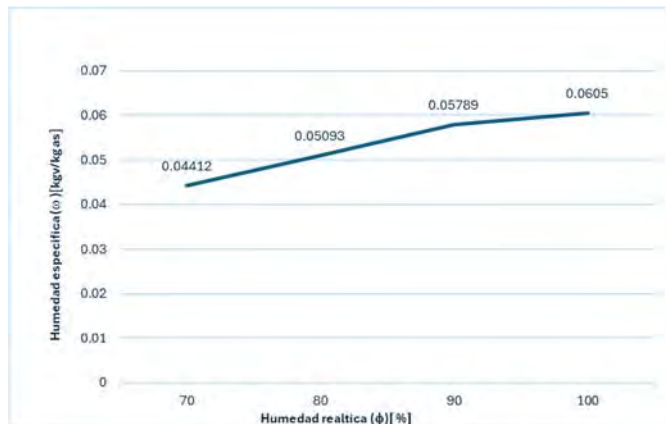
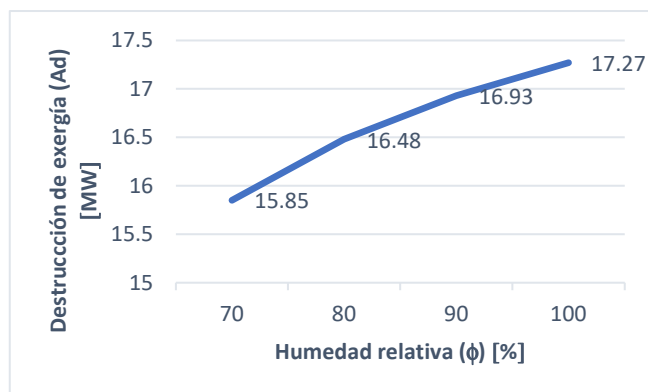


FIGURA 3. Variación de la humedad específica con el cambio de humedad relativa.



$$f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}}$$

FIGURA 4. Variación de destrucción de exergía con el cambio de humedad relativa.

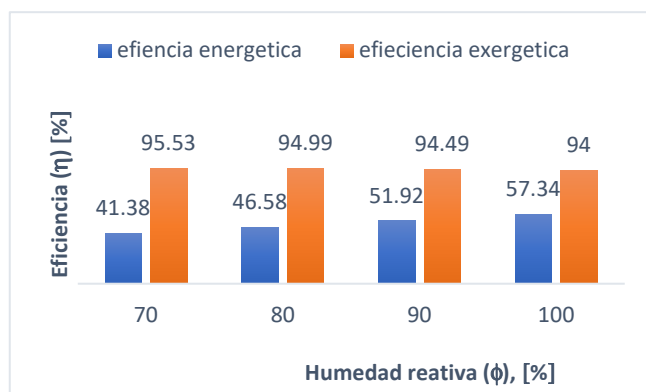


FIGURA 5. Variación de las eficiencias energética y exergetica con el cambio de humedad relativa.

En la Figura 5 se muestra la variación de la eficiencia energética y exergetica con el cambio de humedad relativa, donde se observa que la eficiencia energética varía de 41.38 % a 57.34 % esto es provocado por el aumento de la humedad relativa y por consiguiente aumento de la temperatura de bulbo húmedo, que es un parámetro que define la eficiencia de primera ley de acuerdo con la ecuación (22), caso contrario de la eficiencia exergetica disminuye de 95.53% a 94%, esto es provocado porque a mayor humedad relativa, mayor destrucción de exergía, por lo que esta eficiencia está definida por la destrucción de exergía como se demuestra en la ecuación (26).

Interpretación física de la variación de eficiencias con la humedad relativa de salida

El aumento de la eficiencia energética con la humedad relativa de salida (de 41.4 % a 57.3 % al pasar de 70 % a 100 % de φ) puede explicarse porque, al acercarse el aire de salida al estado de saturación, la diferencia entre su temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de salida del agua disminuye y como la eficiencia energética (Ec. 22) se define respecto al máximo enfriamiento teórico posible, dado por la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada, un aire de salida más húmedo implica que el proceso se aproxima más a ese límite ideal termodinámico de primera ley (es decir, el agua se enfría más cerca de $T_{b,h,entrada}$). Sin embargo, esta mejora aparente en el desempeño energético ocurre a costa de irreversibilidades crecientes: al elevarse la humedad relativa de salida, el gradiente de potencial químico entre el agua líquida y el aire disminuye, lo que requiere mayores gradientes térmicos locales y mayores flujos de vapor para lograr la misma transferencia de calor, intensificando la fricción, la mezcla irreversible y la difusión no ideal. Esto se refleja en un aumento de la destrucción de exergía (de 15.85 MW a 17.27 MW), lo cual reduce la eficiencia exergetica (de 95.53 % a 94 %). En otras palabras, aunque se extrae más energía útil (enfriamiento), el costo termodinámico (pérdida de capacidad para producir trabajo) es mayor, una compensación entre primer y segundo principios que evidencia los límites del análisis puramente energético.

4. CONCLUSIONES

En comparación con estudios recientes de análisis exergetico en torres de enfriamiento, el presente caso se alinea con los



hallazgos de Muangnoi et al. (2008)[9], quienes también reportaron que el aumento de la humedad relativa del aire de salida mejora la eficiencia energética pero deteriora la eficiencia exergética debido al incremento en la destrucción de exergía comportamiento físicamente coherente con la intensificación de irreversibilidades asociadas a la transferencia de masa en condiciones cercanas a la saturación. Sin embargo, difiere notablemente de configuraciones sin evaporación, como las torres de enfriamiento secas analizadas por Ruiz et al. (2025)[15], donde la ausencia de transferencia de masa elimina la contribución de la exergía química y reduce significativamente la destrucción de exergía (valores típicos < 5 MW en torres de tamaño comparable), aunque con eficiencias energéticas más bajas (< 35 %). La torre aquí estudiada húmeda, de flujo cruzado y tiro inducido, en operación real de una central híbrida presenta una destrucción de exergía relativamente alta (15.49 MW a $\phi = 80$ %), pero compensa con eficiencias energética (46.6 %) y exergética (94.9 %) superiores, lo que refleja el equilibrio inherente entre capacidad de enfriamiento y calidad del proceso termodinámico en sistemas evaporativos industriales.

En este artículo se presenta el análisis térmico de una torre de enfriamiento de tipo húmedo de una central termoeléctrica, la metodología aquí desarrollada ha permitido demostrar el procedimiento necesario para realizar el análisis térmico de las torres de enfriamiento a partir de la primera ley y segunda ley de la termodinámica. Los análisis exergéticos son un complemento de los análisis energéticos. En el análisis exergético se analiza la recuperación y suministro de los sistemas de energía, las irreversibilidades que ocurren en el sistema de energía, la destrucción de exergía, logrando así identificar el uso adecuado o inadecuado de la energía en los procesos. Las conclusiones más importantes del análisis son:

- La eficiencia energética aumenta con la humedad relativa del aire de salida, debido a que el proceso se aproxima más al límite teórico de enfriamiento (dado por la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada), tal como se observa al incrementar ϕ de 70 % a 100 % (de 41.38 % a 57.34 %).
- En contraste, la eficiencia exergética disminuye con el aumento de la humedad relativa, lo cual refleja un incremento en las irreversibilidades del proceso evidenciado por el aumento de la destrucción de exergía de 15.85 MW a 17.27 MW y subraya la importancia del

análisis de segunda ley para evaluar la calidad del uso energético.

En general el análisis térmico, a partir de la primera ley y segunda ley de la termodinámica, junto con los parámetros de eficiencia energética y exergética, ayudan a puntualizar acciones correctivas que se puedan realizar para un mejor aprovechamiento de la energía.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana por el apoyo otorgado para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- [1]. Younis, M. A. (1989). *New Approach to Determine the Heat+ transfer Coefficients for Cooling Tower Packing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 203(2), 75-84.
- [2]. Kloppers, J. C., & Kröger, D. G. (2005). *A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers. International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(3-4), 765-777.
- [3]. ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment. (2016). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [4]. Ghosh, S., & Ganguly, A. (2013). *Performance Analysis of Cooling Tower Using CFD as a Tool. Procedia Engineering*, 51, 642-647.
- [5]. Lewis, W. K., & Whitman, W. G. (1924). *Principles of Gas Absorption. Industrial & Engineering Chemistry*, 16(12), 1215-1220.
- [6]. Khan, J. R., & Khan, M. A. (2011). *Thermal performance evaluation of natural draft cooling tower using effectiveness-NTU method. Applied Thermal Engineering*, 31(6-7), 1033-1038.
- [7]. Wang T, Zhang L, *Numerical simulation study on water distribution optimization of natural draft wet cooling tower based on air-water heat transfer. Applied Thermal Engineering* 278:127414 (2025) 10.1016/j.applthermaleng.2025.127414





- [8]. Moran M., J, Shapiro H, N, Fundamentos de termodinámica técnica, 2da Edición, Reverte, 2004. ISBN-84-291-4313-0.
- [9]. Muangnoi T, Asvapoositkul W, Wongwises S, *Effects of inlet relative humidity and inlet temperature on the counterflow wet cooling tower based on exergy analysis*. Energy Conversion and Management 49: 2795–2800 (2008) 10.1016/j.enconman.2008.03.019
- [10]. Shan C, Wang J, Cao Y, Li H, *Multi-objective optimization of a novel combined cooling, heating and power solar thermal energy storage system: A comprehensive analysis of energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental performance*. Energy 316: 134464 (2025) 10.1016/j.energy.2025.134464
- [11]. Koronaki I.P., Papoutsis E.G., Papaefthimiou V.D., *Thermodynamic modeling and exergy analysis of a solar adsorption cooling system with cooling tower in Mediterranean conditions*. Applied Thermal Engineering 99: 1027–1038 (2016) 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.151
- [12]. T. J. Kotas, “The exergy method of thermal plant analysis”, Krieger. (1995) ISBN-0-89464-946-9.
- [13]. Comisión Federal de Electricidad, *Prontuario de Datos técnicos*. (1994)
- [14]. Reyes A, “Evaluación exergética de una torre de enfriamiento de una Central Termoeléctrica de Ciclo Híbrido de 550 MW”, Tesis de Maestría en Ciencias, ESIME, IPN, MÉXICO, DF, 2011.
- [15]. Ruiz J, Gascó C, Opolot M, Hooman K, *Performance evaluation of natural draft dry cooling towers and pre-cooled natural draft dry cooling towers in concentrated solar power plants*. Energy 333:137362 (2015) 10.1016/j.energy.2025.137362



eficiencia energética, energías convencionales y energías renovables.

Arturo Reyes León. Es profesor investigador del Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, en la Ciudad de México, México, obtuvo la licenciatura, maestría y doctorado en ingeniería mecánica en el Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México. Ha participado en proyectos energéticos con la CFE (empresa estatal de energía eléctrica) y PEMEX (empresa estatal de petróleo y gas). Sus líneas de investigación actuales incluyen la





Interacciones entre soluciones basadas en la naturaleza y energía. Un estudio bibliométrico

ANA LAURA CERVANTES NÁJERA¹, MARIA CONCEPCIÓN MARTINEZ RODRIGUEZ¹, A CATHERINE NIETO MORENO¹

¹Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD), Instituto Politécnico Nacional (IPN), 30 de Junio de 1520 s/n, La Laguna Ticoman, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, 07340, MÉXICO

Autor de Correspondencia: María Concepción Martínez Rodríguez (e-mail: mcmartinezzr@ipn.mx).

RESUMEN El cambio climático tiene varios efectos a escala global que impactan en el desarrollo sustentable, la generación de energía es uno de sus principales causantes debido a los impactos ambientales que produce. En este contexto, se han propuesto diversas medidas de mitigación y adaptación entre ellas se encuentran el ahorro energético y las soluciones basadas en la naturaleza (SbN). Este estudio tiene como objetivo encontrar la relación entre ambas a través de revisión bibliométrica y su respectivo análisis de la producción científica. Para ello, se recopiló información de la base de datos ScienceDirect y Scopus, la cual se procesó en el paquete Bibliometrix en R. Se recopilaron 2,742 artículos de acceso abierto publicados entre 2014-2024. A partir del análisis de mapas temáticos y de co-ocurrencia de palabras clave, se observó que aún no existe una conexión directa en la literatura entre las SbN y la eficiencia energética. Sin embargo, se determinaron asociaciones significativas con conceptos como energías renovables, análisis del ciclo de vida y economía circular. Los vínculos existentes identificados son en aplicaciones específicas, estudios que evalúan la reducción del consumo energético mediante el control pasivo de temperatura a través de la implementación de SbN. Este trabajo evidencia un área de oportunidad para futuras investigaciones que exploren el vínculo entre las SbN con el ahorro y la eficiencia energética, especialmente para la adaptación al cambio climático en sectores como las infraestructuras verdes, el tratamiento de aguas y la planificación urbana sustentable.

PALABRAS CLAVE: Ahorro energético, cambio climático, desarrollo sustentable, infraestructura verde.

RESUMEN GRÁFICO



1. INTRODUCCIÓN

El sector energético, que incluye la electricidad, la calefacción, el transporte y la industria, representa aproximadamente el 76 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), su producción, distribución y uso impactan de manera considerable al medio ambiente [1], [2]. Por lo que se han promovido varias estrategias de mitigación y adaptación, como la sustitución de combustibles fósiles por fuentes renovable, descarbonización del transporte, tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, entre las cuales destacan el ahorro energético y las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) [3], [4], [5]. Las SbN se han establecido como métodos integrales que utilizan los procesos ecológicos para producir beneficios ambientales, sociales y económicos [6], [7]. A pesar de que históricamente se han vinculado a la preservación de la biodiversidad y a la administración del agua o el suelo, en los últimos años ha aumentado el interés por indagar su conexión con la eficiencia energética [7].





1.1. Soluciones basadas en la naturaleza y su vínculo con la eficiencia energética

Las SbN son descritas por la UICN como iniciativas que se fundamentan y apoyan en los procesos naturales para enfrentar diversos retos sociales, tales como la mitigación del cambio climático, la gestión del agua, la salud y el desarrollo urbano [8]. Estas propuestas se han integrado de manera gradual en políticas ambientales, urbanas y climáticas a nivel mundial, debido a su habilidad para abordar varios objetivos, como la disminución de emisiones, la gestión del agua, la preservación de suelos y el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria.

Entre las SbN más utilizadas son los corredores biológicos y los parques urbanos han sido promovidos para mantener la conectividad ecológica, lo que favorece la biodiversidad y proporciona espacios funcionales ante olas de calor y eventos extremos [9], [10]. De forma paralela, la restauración de humedales y manglares representa una estrategia que permite almacenar carbono de manera eficaz, al tiempo que actúa como una barrera natural contra inundaciones y tormentas costeras, particularmente en regiones vulnerables al ascenso del nivel del mar [11], [12], [13]. Otras prácticas incluyen los sistemas agroforestales y silvopastoriles, que combinan cultivos o ganado con vegetación leñosa, favoreciendo el secuestro de carbono, la conservación del suelo y la regulación de los ciclos hídricos [14], [15].

En áreas urbanas se ha promovido la implementación de jardines de lluvia y pavimentos permeables, los cuales permiten mejorar la infiltración del agua de lluvia y disminuir la exposición a inundaciones repentinas [16], [17], [18], [19]. De igual forma, se encuentran los techos y muros verdes, los cuales han sido implementados como una medida que contribuye a la regulación térmica y a la eficiencia energética en entornos urbanos, además de reducir el escurrimiento superficial y la carga sobre los sistemas de drenaje pluvial [20], [21], [22].

A partir de la crisis climática y la transición energética ha surgido la necesidad de cambiar los sistemas de producción y consumo energético [23]. La eficiencia energética es una de las estrategias clave para mitigar el cambio climático promovidas a nivel mundial [24]. La producción de energía tradicional que utiliza combustibles fósiles continúa siendo uno de los mayores responsables de las emisiones de GEI a nivel mundial, a pesar de las alternativas existentes que las reducen [25].

Como respuesta, se han promovido estrategias para incentivar la eficiencia energética, disminuir el consumo y

diversificar las fuentes a través de energías renovables. Esta conversión podría satisfacer los compromisos del Acuerdo de París y avanzar en los ODS, especialmente los vinculados a la energía asequible y limpia (ODS 7) y la acción climática (ODS 13)[26].

En el entorno urbano, las acciones para mejorar la eficiencia energética se han enfocado en optimizar el diseño arquitectónico, la inclusión de sistemas pasivos de ventilación e iluminación, y en la actualización de equipos y electrodomésticos con elevados estándares de rendimiento energético [20], [21]. En algunos escenarios, la modernización para la conservación de energía puede reducir el consumo de energía de los edificios urbanos hasta en un 40-47 % [27], [28]. Aunado a esto, las construcciones verdes han evidenciado su función en mejorar el consumo energético [29].

A nivel industrial, las medidas de eficiencia abarcan la mejora de procesos de producción, la recuperación de calor residual, la utilización de motores eficientes y la adopción de sistemas de gestión energética. De manera complementaria, en el ámbito del transporte se ha incentivado la adopción de vehículos eléctricos, además de optimizaciones en la logística y la utilización de biocombustibles [30], [31], [32], [33]. Estas acciones, aunque no eliminan por completo la necesidad de avanzar hacia fuentes renovables, ayudan a reducir los requerimientos energéticos. En años recientes, el potencial energético de las SbN se ha investigado particularmente en lo que respecta a su papel en el ahorro de energía y la eficiencia térmica. No obstante, la evidencia que facilite la comprensión de esta interacción sigue siendo escasa, este estudio surge de la necesidad de identificar y examinar la producción científica que relaciona SbN con energía, especialmente en lo que respecta a ahorro y eficiencia. Por lo que el objetivo de este trabajo es realizar un estudio bibliométrico para analizar la producción científica sobre las interacciones entre las SbN y la energía que haga visible las tendencias, los vacíos y las oportunidades en esta línea de investigación en desarrollo.

2. METODOLOGÍA

El estudio utilizó la metodología PRISMA con el objetivo de examinar la producción científica vinculada a las interacciones entre SbN y el ahorro energético. La búsqueda se realizó en dos bases de datos Science Direct y Scopus ambos de Elsevier. En ambas plataformas se estableció el período de publicación entre 2014 y 2024, se aplicaron filtros para filtrar los resultados a documentos de tipo artículos científicos de acceso abierto.



En la primera etapa se empleó ScienceDirect, que se especializa en el acceso a los contenidos de artículos de ciencias aplicadas y tecnología, para la identificación preliminar de temas, vacíos y relaciones de conceptos. La cadena de búsqueda incluye términos que pueden incluirse en artículos en estas temáticas. En la segunda etapa se utilizó el repositorio Scopus, por las propiedades de indexación que facilita la observación de tendencias temporales, así como de la distribución geográfica de las publicaciones. La cadena de búsqueda se limitó a las palabras clave "nature-based solutions" (SbN) y "energy" (energía).

Después de completar las búsquedas, se llevó a cabo la extracción de los registros. Estos fueron exportados en formato BibTeX para analizarse con el paquete Bibliometrix y su interfaz Biblioshiny, en RStudio. En estas herramientas se realiza análisis para reconocer tendencias, brechas temáticas y conexiones conceptuales que surgen entre las SbN y el ahorro de energía, y determinar el nivel de consolidación de este ámbito de estudio.

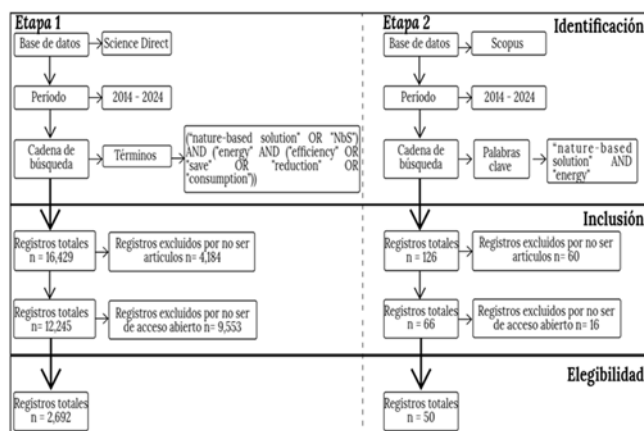


FIGURA 1. Diagrama PRISMA

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la primera etapa se obtuvieron 2,692 artículos de acceso abierto, de los cuales se examinaron tanto las tendencias generales de la producción científica como las relaciones específicas entre las SbN y el sector energético. Los temas motores de la figura 2 se destacan áreas como la agricultura, que muestra alta centralidad y densidad, indicando que es un tema sólido y con conexiones fuertes dentro de los estudios recopilados. El cuadrante inferior derecho, que corresponde a los temas básicos, agrupa los conceptos fundamentales que

se encuentran en desarrollo. Algunos de estos son "SbN", "cambio climático", "servicios ecosistémicos", además de términos relacionados con el sector energético, tales como "emisiones de carbono", "energía renovable", "economía circular", y métodos analíticos como "evaluación del ciclo de vida" y "aprendizaje automático", aunque la complejidad de

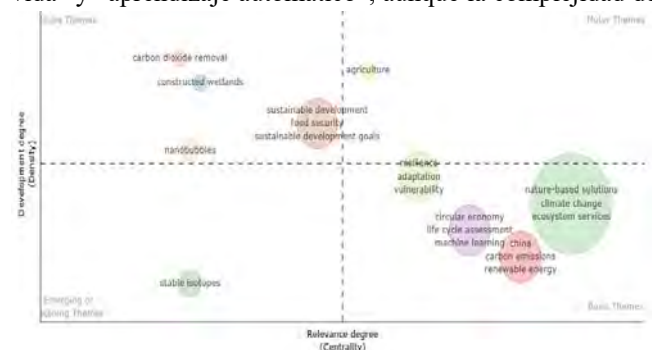


FIGURA 2. Mapa temático con resultados de Science Direct

La figura 3 muestra un mapa de co-ocurrencia de palabras; "cambio climático" y "soluciones basadas en la naturaleza", se presentan con el tamaño y la densidad de conexiones más altos, como temas centrales del área de estudio. Los dos términos están fuertemente vinculados a "adaptación", "resiliencia", "sustentabilidad", "gobernanza", "justicia ambiental" y "planificación urbana", lo que demuestra un enfoque en el manejo del territorio y la acción climática desde una visión socio ecológica. De la misma forma, aunque con menor intensidad que los nodos centrales, se notan conexiones con variables necesarias para la transición energética y el desarrollo sustentable, como "energía renovable", "emisiones de carbono", "neutralidad de carbono", "transición energética" y "evaluación del ciclo de vida". Esto indica que, aunque los temas energéticos aparecen en la literatura relacionada con SbN, su incorporación no es aún sistemática o prioritaria. Los términos como "economía circular", "secuestro de carbono", "techos verdes" y "humedales construidos", que reflejan aplicaciones específicas de las SbN con el potencial de favorecer el ahorro energético o la disminución de emisiones. Sin embargo, estos conceptos evolucionan de manera aislada, y no como parte de un enfoque energético dentro de las SbN. Por otro lado, conceptos como "seguridad alimentaria", "remoción de dióxido de carbono" y "agua" surgen como temas relacionandos a los retos medioambientales con aspectos sociales del desarrollo sustentable. Esto preliminarmente indica un discurso

académico en paralelo, en lugar de una integración de conceptos.

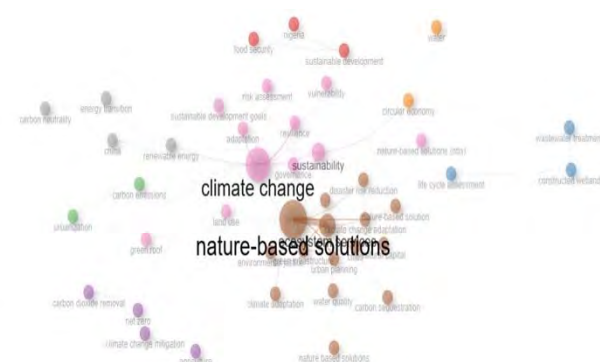


FIGURA 3. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave con resultados de Science Direct

La tendencia previamente mencionada sobre el paralelismo del desarrollo de las temáticas se observa con las SbN y el cambio climático siendo los nodos centrales enlazados, evidenciando la integración con términos como resiliencia, adaptación, planificación urbana, gobernanza y justicia ambiental. No obstante, los términos relacionados con la eficiencia o el ahorro energético, aunque están presentes se encuentran en posiciones marginales de la red, lo que sugiere una menor cohesión temática. Aunque surgen aplicaciones específicas como techos verdes o humedales construidos, estas no se consideran una categoría vinculada al análisis energético.

Estos mapas muestran una discrepancia temática entre las SbN y los enfoques relacionados con la energía. A pesar de que se reconocen los beneficios indirectos de las SbN para la mitigación del cambio climático, estos todavía no se reflejan en marcos analíticos sistemáticos que incluyan indicadores de eficiencia energética, ahorro de recursos o efectos en la demanda energética. Asimismo, las investigaciones suelen enfocarse en aspectos ecológicos o sociales de las SbN, relegando la dimensión energética como elemento central.

En la segunda etapa se obtuvieron 50 artículos, aunque el número es significativamente menor, de los registros obtenidos previamente, este conjunto de publicaciones presenta una mayor relevancia y especificidad temática. En la figura 4 se observa un aumento gradual en la aparición de palabras clave en los artículos indexados, lo que indica un aumento del interés académico por la convergencia entre SbN y cuestiones vinculadas a la sustentabilidad, energía y

ecosistemas. Dicho crecimiento es en 2022, ya que en años previos los conceptos centrales se presentaban dispersos o desconectados, esto es consistente con el enfoque sistémico impulsado por organizaciones internacionales y agendas globales.

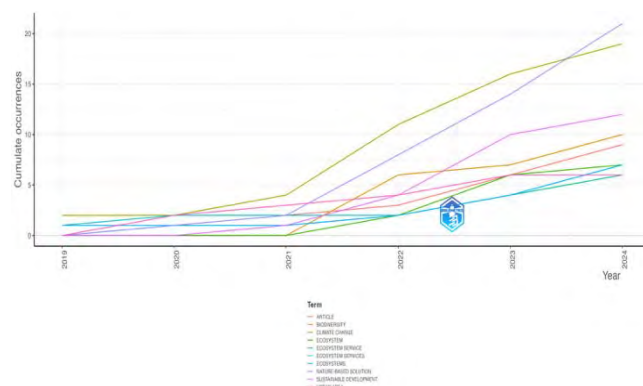


FIGURA 4. Frecuencia de palabras a través del tiempo

La figura 5 es el mapa temático con resultados de Scopus, el cual en comparación con la figura 2, creado a partir de la información de ScienceDirect, muestra una diversificación temática y consolidación de las SbN como categoría. En la sección superior derecha de este mapa temático se reúnen conceptos que poseen alta densidad y centralidad enlazados con otros temas en el área; destacan palabras como “cambio climático”, “solución basada en la naturaleza”, “área urbana”, “gases de efecto invernadero”, “vegetación”, y “estudio controlado”. Estos terminos reflejan la creciente relevancia de las SbN en entornos urbanos, y su conexión con la reducción del cambio climático, la gestión hídrica y la agricultura.

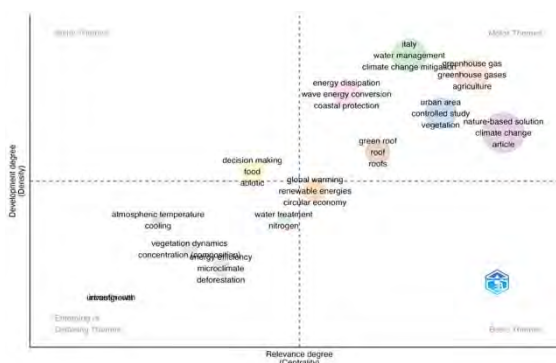


FIGURA 5. Mapa temático con resultados de Scopus

En el cuadrante inferior izquierdo se encuentran conceptos como “inversión”, “crecimiento urbano”, “dinámicas de vegetación” y “deforestación”, con baja densidad y centralidad. Este conjunto parece dirigirse hacia elementos macrosociales y de gobernanza, lo que puede entenderse como una extensión de la perspectiva hacia las condiciones estructurales que influyen en la aplicación de SbN. Las intersecciones entre las SbN y el ámbito energético se evidencian en el cuadrante central inferior, donde se encuentran “renewable energies”, “circular economy”, “global warming”, y “energy efficiency”; su proximidad al eje central del gráfico indica que están adquiriendo importancia y podrían desarrollarse hacia ser temas clave.

El mapa de co-ocurrencia de palabras con los resultados de la búsqueda en Scopus, se presenta en la figura 6, la red presenta una diversidad amplia de temas interrelacionados: energía, agricultura, administración del agua, reducción del cambio climático, evaluación económica. “Nature-based solutions” se presenta como el nodo más destacado, después aparecen “cambio climático”, “desarrollo sustentable”, “ecosistemas” y “artículo” como ideas clave, esto indica que las SbN están siendo tratadas desde diversas disciplinas, lo que refleja su transversabilidad y consolidación. Se delimitan a las SbN desde una perspectiva sistémica, alineada con políticas públicas, servicios ecosistémicos y análisis de costo-beneficio. Se notan agrupaciones en torno a conceptos como infraestructura verde, servicios ecosistémicos, cambio climático y planificación urbana, que se interrelacionan a través de nodos compartidos como áreas urbanas y sustentabilidad. No obstante, una vez más se observa la falta de conexiones sólidas entre estos conceptos y aquellos relacionados con el sector energético, como eficiencia energética, ahorro energético o energías renovables. En este sentido, el análisis de la información obtenida tanto en ScienceDirect como en Scopus mostró que, a pesar de la extensa cobertura temática, todavía no hay una relación explícita y continua entre las SbN y energía, lo que subraya una oportunidad en futuras investigaciones interdisciplinarias.

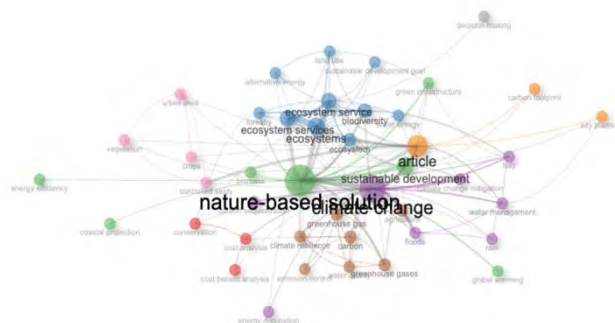


FIGURA 6. Mapa de co-ocurrencia de palabras clave con resultados de Scopus

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este análisis bibliométrico lograron cumplir con el objetivo: identificar las tendencias temáticas relevantes, relaciones conceptuales y lagunas de conocimiento en la literatura científica vinculada a las SbN y su potencial conexión con la dimensión energética. En primera instancia se observa que el ahorro o eficiencia de energía, aún no han sido integrados consistentemente en los estudios de SbN. A pesar de que las SbN si están siendo discutidas en marcos del cambio climático, resiliencia y planificación urbana, no se identifica un vínculo directo en la literatura revisada con conceptos de energía. No obstante, esto podría considerarse como un área de oportunidad, para investigaciones futuras en donde interdisciplinariamente las SbN se analicen por sus beneficios socio ecológicos y la mejora al rendimiento energético. En este sentido, aquellas investigaciones que integren SbN con análisis del ciclo de vida o costo beneficio, así como la evaluación del rendimiento térmico de infraestructuras verdes o la medición de la energía demandada evitada son oportunidades para producir evidencia para políticas públicas enfocadas a la transición energética. Asimismo, se proponen análisis comparativos regionales, por tipos de infraestructura verde o escalas de intervención, los cuales integren indicadores cuantitativos de los beneficios energéticos relacionados con dichas soluciones. La consolidación de esta línea de investigación ayudará a entender el potencial de las SbN como elementos para una transición energética equitativa y sustentable.



REFERENCIAS

- [1] J. Kiviluoma *et al.*, “Flexibility From the Electrification of Energy: How Heating, Transport, and Industries Can Support a 100% Sustainable Energy System,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 20, no. 4, pp. 55–65, Jul. 2022, doi: 10.1109/MPE.2022.3167576.
- [2] W. F. Lamb *et al.*, “A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018,” *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 7, p. 073005, Jul. 2021, doi: 10.1088/1748-9326/abee4e.
- [3] International Union for Conservation of Nature (IUCN), *What are Nature-based Solutions?* 2016. [Online]. Available: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf>
- [4] J. Hwang, K. Maharjan, and H. Cho, “A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 74, pp. 28629–28648, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.024.
- [5] D. Tonini, L. Hamelin, M. Alvarado-Morales, and T. F. Astrup, “GHG emission factors for bioelectricity, biomethane, and bioethanol quantified for 24 biomass substrates with consequential life-cycle assessment,” *Bioresour Technol*, vol. 208, pp. 123–133, May 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.02.052.
- [6] L. Tozer, K. Hörschelmann, I. Anguelovski, H. Bulkeley, and Y. Lazova, “Whose city? Whose nature? Towards inclusive nature-based solution governance,” *Cities*, vol. 107, no. July, p. 102892, 2020, doi: 10.1016/j.cities.2020.102892.
- [7] L. Xie and H. Bulkeley, “Nature-based solutions for urban biodiversity governance,” *Environ Sci Policy*, vol. 110, no. May, pp. 77–87, 2020, doi: 10.1016/j.envsci.2020.04.002.
- [8] International Union for Conservation of Nature (IUCN), “IUCN European Work Programme 2017-2020,” Nature-based solutions. Accessed: Sep. 29, 2020. [Online]. Available: <https://www.iucn.org/regions/europe/our-work/nature-based-solutions>
- [9] V. Derr, “Urban green spaces as participatory learning laboratories,” *Proc Inst Civ Eng Urban Des Plan*, vol. 171, no. 1, pp. 25–33, 2018, doi: 10.1680/jurdp.17.00009.
- [10] C. van Ham and H. Klimmek, “Partnerships for Nature-Based Solutions in Urban Areas – Showcasing Successful Examples,” 2017, pp. 275–289. doi: 10.1007/978-3-319-56091-5_16.
- [11] S. Alikhani, P. Nummi, and A. Ojala, “Urban Wetlands: A Review on Ecological and Cultural Values,” *Water (Basel)*, vol. 13, no. 22, p. 3301, Nov. 2021, doi: 10.3390/w13223301.
- [12] Q. Zhao, J. Bai, L. Huang, B. Gu, Q. Lu, and Z. Gao, “A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration,” *Ecol Indic*, vol. 60, pp. 442–452, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.07.003.
- [13] A. E. Sutton-Grier and P. A. Sandifer, “Conservation of Wetlands and Other Coastal Ecosystems: a Commentary on their Value to Protect Biodiversity, Reduce Disaster Impacts, and Promote Human Health and Well-Being,” *Wetlands*, vol. 39, no. 6, pp. 1295–1302, Dec. 2019, doi: 10.1007/s13157-018-1039-0.
- [14] M. L. Jat *et al.*, “Conservation agriculture for sustainable intensification in South Asia,” *Nat Sustain*, vol. 3, no. 4, pp. 336–343, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41893-020-0500-2.
- [15] G. A. Azunre, O. Amponsah, C. Peprah, S. A. Takyi, and I. Braimah, “A review of the role of urban agriculture in the sustainable city discourse,” *Cities*, vol. 93, no. May, pp. 104–119, 2019, doi: 10.1016/j.cities.2019.04.006.
- [16] A. Nacxit, “Rainwater Capturing in Mexico City: The Adoption of the Social Practice,” Vienna University of Economics and Business, 2020.
- [17] P. Huang, K. Zhang, and T. F. M. Chui, “Hydrologic performance of permeable pavements under extreme and regular rainfall conditions,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 652, p. 132653, May 2025, doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.132653.
- [18] S. Bagiouk, D. Sotiriadis, and K. L. Katsifarakis, “Combining Pocket Parks with Ecological Rainwater Management Techniques in High-Density Urban Environments,” *Environmental Processes*, vol. 11, no. 1, p. 7, Mar. 2024, doi: 10.1007/s40710-024-00690-x.
- [19] C.-F. Chen, J.-W. Lin, and J.-Y. Lin, “Hydrological Cycle Performance at a Permeable Pavement Site and a Raingarden Site in a Subtropical Region,” *Land (Basel)*, vol. 11, no. 6, p. 951, Jun. 2022, doi: 10.3390/land11060951.
- [20] I. Teotónio, C. M. Silva, and C. O. Cruz, “Economics of green roofs and green walls: A literature review,” *Sustain Cities Soc*, vol. 69, p. 102781, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.102781.
- [21] M. Manso, I. Teotónio, C. M. Silva, and C. O. Cruz, “Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, no. November 2019, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110111.
- [22] A. Harbiankova and M. Manso, “Integrating green roofs and green walls to enhance buildings thermal





performance: A literature review,” *Build Environ*, vol. 270, p. 112524, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.buildenv.2025.112524.

[23] F. Wu *et al.*, “Responding climate change: A bibliometric review on urban environmental governance,” *J Clean Prod*, vol. 204, pp. 344–354, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.067.

[24] A. Kamal, S. G. Al-Ghamdi, and M. Koc, “Revaluating the costs and benefits of energy efficiency: A systematic review,” *Energy Res Soc Sci*, vol. 54, pp. 68–84, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.erss.2019.03.012.

[25] E. Kocak, E. E. Ulug, and B. Oralhan, “The impact of electricity from renewable and non-renewable sources on energy poverty and greenhouse gas emissions (GHGs): Empirical evidence and policy implications,” *Energy*, vol. 272, p. 127125, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127125.

[26] Organización de las Naciones Unidas (ONU), *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. 2018.

[27] Z. Deng, K. Javanroodi, V. M. Nik, and Y. Chen, “Using urban building energy modeling to quantify the energy performance of residential buildings under climate change,” *Build Simul*, vol. 16, no. 9, pp. 1629–1643, Sep. 2023, doi: 10.1007/s12273-023-1032-2.

[28] Y. Chen, Z. Ren, Z. Peng, J. Yang, Z. Chen, and Z. Deng, “Impacts of climate change and building energy efficiency improvement on city-scale building energy consumption,” *Journal of Building Engineering*, vol. 78, p. 107646, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.107646.

[29] Amirhosein GhaffarianHoseini, Nur Dalilah Dahlan, Umberto Berardi, Ali GhaffarianHoseini, Nastaran Makaremi, and Mahdiar GhaffarianHoseini, “Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, no. 0, pp. 1–17, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.010.

[30] F. Orsini and P. Marrone, “Approaches for a low-carbon production of building materials: A review,” *J Clean Prod*, vol. 241, p. 118380, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118380.

[31] J. Gao *et al.*, “Greenhouse gas emissions reduction in different economic sectors: Mitigation measures, health co-benefits, knowledge gaps, and policy implications,” *Environmental Pollution*, vol. 240, pp. 683–698, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.05.011.

[32] Y. Mashayekh *et al.*, “Potentials for Sustainable Transportation in Cities to Alleviate Climate Change Impacts,” *Environ Sci Technol*, vol. 46, no. 5, pp. 2529–2537, Mar. 2012, doi: 10.1021/es203353q.

[33] D. L. Bleviss, “Transportation is critical to reducing greenhouse gas emissions in the United States,” *WIREs Energy and Environment*, vol. 10, no. 2, Mar. 2021, doi: 10.1002/wene.390.

Ana Laura Cervantes Nájera,
María Concepción
Martínez Rodríguez y
Catherine Nieto
Moreno. Las autoras son
parte del equipo de trabajo
del Laboratorio de políticas
públicas interdisciplinarias
con un enfoque de
sustentabilidad en el
CIEMAD del IPN





Obtención de colorante sensibilizador a partir de cáscara de aguacate para su aprovechamiento en celda solar DSSC

CONCEPCIÓN DUMAS RAMÍREZ¹, MARÍA CRISTINA CASTAÑÓN BAUTISTA², OSCAR DIEGO ARMENDÁRIZ IBARRA³, MARÍA DE LOS REMEDIOS SANCHEZ DÍAZ⁴, RODRIGO VIVAR OCAMPO⁵

^{1,2,3,5}Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Blvd. Universitario No. 1000, Tijuana B. C., México

⁴Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias de la Salud, Blvd. Universitario No. 1000, Tijuana B. C., México

Autor de Correspondencia: Concepción Dumas Ramírez (e-mail: dumas.concepcion@uabc.edu.mx).

Este trabajo fue financiado por la **Universidad Autónoma de Baja California**, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, bajo la subvención del Proyecto “**Evaluación de Sensibilizantes Orgánicos para la producción de celdas fotovoltaicas a partir de residuos de la industria agroalimentaria**”.

RESUMEN México representa el 12vo lugar en la generación de residuos a nivel mundial, provenientes de la industria agroalimentaria. Además, la demanda energética continua en aumento y requiere de soluciones sostenibles, es aquí donde las energías renovables toman un papel muy importante en la generación de energía a nivel nacional. Una solución prometedora es a través de la valorización de residuos orgánicos como la cáscara de aguacate Hass (*Persea americana* Mill), la cual ofrece una alternativa ecológica para la producción de colorantes naturales aplicables en tecnología fotovoltaica de tercera generación, como las celdas solares DSSC. La metodología utilizada en este trabajo consta recolección de la materia prima, deshidratación (por convección o solar), molienda, extracción del pigmento, purificación comparativa y caracterización molecular. Las cáscaras fueron limpiadas, deshidratadas y molidas en mortero. La extracción se realizó utilizando solventes polares como metanol y acetona. Para eliminar impurezas se filtraron al vacío. Paralelamente, se aplicó un método de percolado en columna para comparar la eficiencia en la eliminación de impurezas. La caracterización se llevó a cabo mediante cromatografía de capa fina, espectrofotometría UV-Vis y espectrometría de masas. Los resultados preliminares muestran que el percolado resultó más eficaz en la purificación del extracto. Las muestras presentaron fluorescencia bajo luz UV. En espectrofotometría UV-Vis, se observaron picos de absorción en 350 nm (muestra concentrada) y 440 nm (muestra purificada). La espectrometría de masas reveló un pico de 441.572 uma al 9.84 %, lo que sugiere la presencia de antocianinas o compuestos afines, las cuales pueden tener

un uso potencial en celdas solares DSSC. El propósito de este trabajo de investigación es la obtención y caracterización de un colorante sensibilizador a partir de la valorización de residuos orgánicos generados en la agroindustria en Baja California y contribuir al desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles.

PALABRAS CLAVE: Celdas solares DSSC, Residuos orgánicos, Sensibilizantes naturales, Cáscara de aguacate, Energías Renovables.

1. INTRODUCCIÓN

Las celdas solares sensibilizadas con pigmentos naturales (DSSC) son de interés por su bajo costo y un proceso de obtención sencillo y donde pueden utilizarse sensibilizantes de origen sintético y naturales (orgánicos e inorgánicos) [1]. Los colorantes orgánicos pueden tener origen animal, de minerales, microorganismos y plantas. De éstas, pueden obtenerse a través de sus hojas, raíces, fruto, flores, semillas, corteza del tallo, etc., y tienen ventajas con relación a los colorantes de origen sintético, ya que generan un impacto negativo menor al ambiente, son abundantes y pueden obtenerse a través de procesos de extracción sencillos [2].

1.1. Características de los colorantes.

De acuerdo con su estructura química los colorantes se clasifican como índigoide, a base de piridina, carotenoides, quinónidos, betalainas, taninos y flavonoides [2], estos últimos se dividen en flavonas, β-lavonoles, flavanonas,



isoflavonas y antocianinas [3]. En el caso de las celdas solares DSSC, los fotosensibilizadores tienen un rol importante en la absorción y conversión de la radiación solar en energía, donde las antocianinas han estado relacionadas con un destacado rendimiento fotovoltaico [4].

Las antocianinas son un compuesto bioactivo y se producen como parte del metabolismo secundario de las plantas [11], pueden estar presentes en una amplia variedad de ellas y son las que les dan el color característico como el rojo o azul intenso [3]. Para la obtención del compuesto bioactivo pueden utilizarse procedimientos como la extracción exhaustiva (vapor o hidrodestilación, prensado, decocción, infusión, extracción Soxhlet, maceración y percolación) [10] o técnicas como la extracción asistida por ultrasonido, extracción asistida por microondas, extracción asistida por enzimas, extracción con fluidos supercríticos, entre otras [11].

En el proceso de extracción de los compuestos bioactivos es prioridad considerar la polaridad del disolvente que permita optimizar el proceso de extracción del pigmento, sin comprometer su rendimiento [9], y en el caso de las antocianinas, De Meester et al [12] refieren que las antocianinas pueden reaccionar a la variación del pH y tener reacciones reversibles. En cuanto a la extracción, puede realizarse usando disolventes como acetona, cloroformo, hexano y metanol o dado que los pigmentos presentan características polares o apolares, pueden utilizarse mezclas de acetona/agua o metanol/agua [3] y obtener mejores resultados.

1.2. Obtención de colorantes a partir de subproductos

A nivel mundial, se estima que casi un tercio (1,300 millones de toneladas) de los alimentos producidos se desperdician, con un valor económico de 680,000 millones de dólares [5] y México ocupa el 12vo lugar en la generación de residuos orgánicos provenientes del sector agroindustrial [6], por lo que es pertinente prevenir el desperdicio durante el ciclo de vida de la producción de alimentos [5] y evitar que sean depositados en tiraderos a cielo abierto o rellenos sanitarios.

Considerando que la composición de los residuos alimentarios es orgánica, pueden aplicarse estrategias para su valorización, como la bioconversión para obtener compuestos bioactivos o nutrientes a través de tecnologías como el compostaje, producción de biogás, fertilizantes y generación de energía renovable entre otras estrategias. En este contexto, el uso de subproductos de frutas como fuente de colorantes de origen natural, representa una alternativa para su uso en pigmentos en celdas solares DSSC.

En este sentido, Muñoz y Rojas (2016), reportaron el potencial de las semillas y cáscaras de aguacate Hass (*Persea americana* Mill) como materia prima de colorantes naturales

para obtener pigmentos de antocianina [7]. El aguacate es una fruta originaria de México y Centroamérica, su peso varía entre los 150 y 400 g, de los cuales las semillas y cáscara pesan alrededor del 21% y 8% de su peso total, desechándose a nivel mundial aproximadamente de 1.6 millones de toneladas [8].

2. METODOLOGÍA

2.1. Manejo de la muestra

Las muestras se recolectaron las cáscaras de aguacate Has, se limpiaron y posteriormente se retiró el exceso de humedad a través de la deshidratación por convección y solar a una temperatura menor de 50°C. Para obtener un tamaño de partícula fina y mejorar la eficiencia en la extracción del pigmento, la muestra se maceró en un mortero.

La extracción del pigmento se realizó a través de dos técnicas: maceración con disolvente y percolado:

Por la técnica de percolado, primero se eliminaron impurezas de la muestra mediante filtrado al vacío, utilizando un filtro Whatman. Paralelamente se aplicó la técnica de percolado en columna, usando como medio filtrante y de adsorción 100 µl de acetato de etilo y 0.1 gr de silica gel respectivamente (Figura 1).



FIGURA 1. Columna de percolado para purificación de muestra

Por la técnica de maceración, la muestra en polvo se disolvió en acetona y metanol al 100% respectivamente, dejando reposar por una semana. Para preservar la muestra se conservó en espacio cerrado, en recipientes color ámbar para protección de la luz natural.

2.2. Caracterización de la muestra

Para determinar la presencia de antocianinas, las muestras se caracterizaron mediante cromatografía de capa fina, espectrofotometría UV-VIS y espectrometría de masas.

3. RESULTADOS

3.1. Espectrofotometría UV-Vis

El resultado de los espectros (absorbancia contra longitud de onda) obtenidos en el espectrofotómetro DR 5000 UV-Vis muestran picos de absorción de acuerdo con el disolvente empleado.

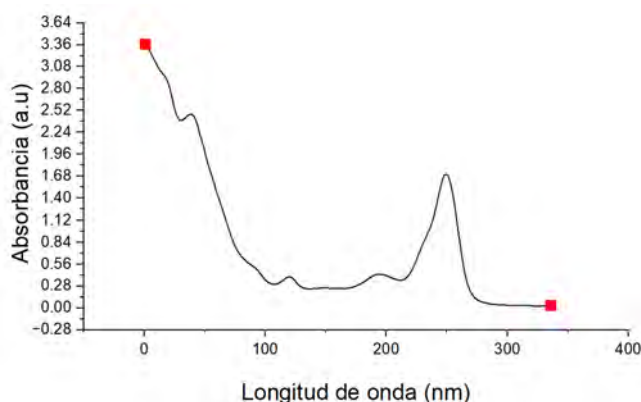


FIGURA 2. Extracción con Acetona a 1 hora y 24 h.

Por otra parte, con los solventes de metanol y etanol a los mismos tiempos de extracción se encontraron resultados similares en los picos de absorción. (Figuras 3 y 4).

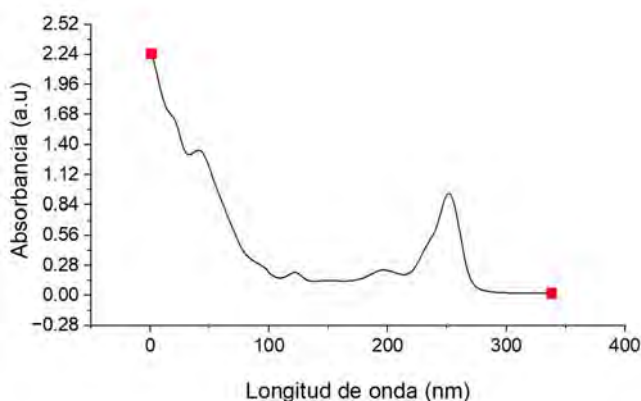


FIGURA 3. Extracción con Metanol a 1 hora y 24 h.

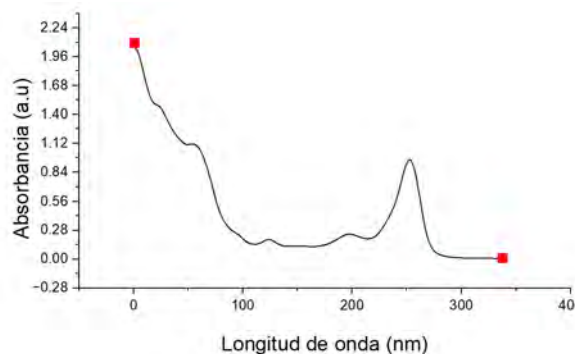


FIGURA 4. Extracción con Etanol a 1 hora y 24 h.

3.2. Espectrometría de masas

En la figura 3 se muestran los resultados de espectrometría de masas, donde de acuerdo con el cálculo estequiométrico se observa la presencia de antocianinas con una relación masa-carga de 441.572 m/z en un porcentaje de 9.84%.

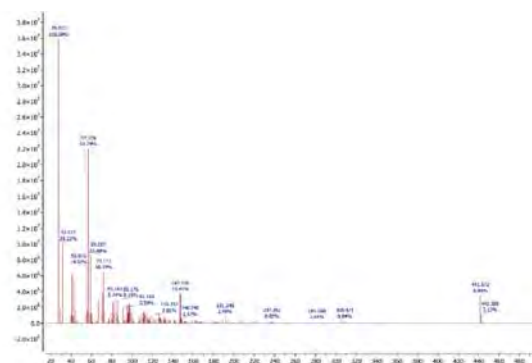


FIGURA 5. Espectro de muestra de cáscara de aguacate

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos mencionar que:

- La extracción del pigmento por el método de percolado resultó más eficaz en la purificación de la muestra.
- Los picos de absorción obtenidos en las muestras de espectrofotometría UV-Vis y espectrometría de masas, corresponden a lo reportado por la bibliografía, por lo que podemos concluir, la presencia de antocianinas o compuestos afines en las muestras de cáscaras de aguacate Hass, lo cual da indicativo de un compuesto con potencial uso como pigmento en celdas solares DSSC.
- En cuanto a la eficiencia de extracción de los solventes, los resultados obtenidos mediante espectrofotometría UV-Vis muestran que, independientemente del solvente

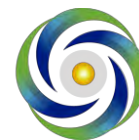


utilizado (acetona, metanol y etanol), los extractos presentan picos de absorción en el mismo rango espectral (200–300 nm), esto sugiere la presencia de compuestos con características cromóforas similares. Sin embargo, la intensidad de absorción varió, pues la extracción con acetona presentó los valores más elevados de absorbancia, lo que indica una mayor eficiencia en la solubilización y recuperación de los compuestos absorbentes en dicha región. Por otra parte, metanol y etanol mostraron absorbancias menores, aunque con perfiles espectrales semejantes. Estos resultados sugieren que la elección del solvente influye principalmente en la cantidad de compuestos extraídos, más que en la naturaleza de los mismos.

REFERENCIAS

- [1]. Balasundra Prabhu R, Shalini S, Prasanna S, Mallick TK, Senthilarasu S, *Review on natural sensitized solar cells: Operation, materials and methods*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 4:1306-1325 (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.052>
- [2]. Yadav Shailendra, Singh Tiwari Kanha, Gupta Chitrasen, Kumar Tiwari Mahendra, Khan Arbaj, Sonkar Sankatha P, *A brief review on natural dyes, pigments: Recent advances and future perspectives*. Results in Chemistry. 5:1-17 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100733>
- [3]. De Souza Marins GA, Silva Miranda PH, Dos Santos AC, Bastos de Freitas BC, De Barros Vilas Boas EV, Damiani Clarissa, *A scientific approach to extraction methods and stability of pigments from Amazonian fruits*. Trends in Food Science & Technology. 113:335-345 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.047>
- [4]. Ghann William, Kang Hyeonggon, Sheikh Tajbik, Yadav Sunil, Chavez-Gil Tulio, Nesbitt Fred, Uddin Jamal, *Fabrication, optimization and characterization of natural dye sensitized solar cell*. Scientific Reports. 7:1-12 (2017). <https://doi.org/10.1038/srep41470>
- [5]. Zeba Usmani, Minaxi Sharma, Abhishek Kumar Awasthi, Gauri Dutt Sharma, Denise Cysneiros, S.Chandra Nayak, Vijay Kumar Thakur, Ravi Naidu, Ashok Pandey, Vijai Kumar Gupta, *Minimizing hazardous impact of food waste in a circular economy. Advances in resource recovery through green strategies*. Journal of Hazardous Materials. 416:1-13 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126154>
- [6]. FAO. 2019. The State of Food and Agriculture 2019. *Moving forward on food loss and waste reduction*. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. ISBN 978-92-5-131789-1
- [7]. Muñoz Echeverri Laura María, y Rojas Bedoya Laura Cristina, *Vigilancia Tecnológica: Metodologías asociadas a la extracción de colorantes naturales desde subproductos de gulupa y aguacate Hass*. Encuentro SENNOVA Del Oriente Antioqueño, 2(1), 54–65. (2016). Recuperado a partir de <https://revistas.sena.edu.co/index.php/Encuentro/articulo/view/2191>.
- [8]. González-Aguilar GA, Salazar López NJ, Domínguez-Avila JA, Yahia EM, Belmonte-Herrera BH, Wall-Medrano Abraham, Montalvo-González Efigenia, *Avocado fruit and by-products as potential sources of bioactive compounds*. Food Research International. 138:1-19 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109774>
- [9]. Naveen Palani, Keren Celestina Mendonce, Rabiya Riffath Syed Altaf, Agilandeswari Mohan, Parthasarathy Surya, Monisha P., Suriyaprakash Rajadesingu, *Advancing one-pot green synthesis of plant-derived nanomaterials for extraction techniques, characterization, multifunctional biomedical applications, challenges and future perspectives*. Materials Today Communications. 46: 1-25 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112780>
- [10]. Radojčić Redovniković Ivanna, Cvjetko Bubalo Marina, Vidović Senka, Stela Jokić, *New perspective in extraction of plant biologically active compounds by green solvents*. Food and Bioproducts Processing. 109: 52-73 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.03.001>
- [11]. Guía-García Jorge L., Charles-Rodríguez Ana V., Reyes-Valdés M. Humberto, Ramírez-Godina Francisca, Robledo-Olivo Armando, García-Osuna Hermilia T., Cerqueira Miguel A., Flores-López María L., *Micro and nanoencapsulation of bioactive compounds for agri-food applications: A review*. Industrial Crops and Products. 186: 1-13. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115198>
- [12]. De Meester Steven, Phan Kim, Van Den Broeck Elias, Van Speybroeck Veronique, De Clerck Karen, Raes Katleen, *The potential of anthocyanins from blueberries as a natural dye for cotton: A combined experimental and theoretical study*. Dyes and Pigments. 176: 1-19 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2019.108180>





Potencial del hidrocarbón solar derivado de la biomasa residual como enmendador de suelos y promotor bioenergético

GABRIELA RUIZ-RENDÓN¹, HEIDI I. VILLAFÁN-VIDALES², TERESA GONZALEZ-NAVA²,
LORENA PALMA-VAZQUEZ³

¹ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco s/n, Col. Centro, Temixco, Morelos, C.P. 62580, México.

² Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital, Carretera Ixmiquilpan-Capula Km. 4 El Nith, Ixmiquilpan, Hidalgo, C.P. 42300, México.

³ Departamento de Química y bioquímica, Instituto Tecnológico de Zacatepec, Tecnológico Plan de Ayala, Zacatepec de Hidalgo, Morelos, C.P. 62780, México.

Autor de Correspondencia: Gabriela Ruiz Rendón (e-mail: garur@ier.unam.mx).

Este trabajo fue financiado por PAPIIT-DGAPA-UNAM bajo el convenio IN107923.

RESUMEN El aprovechamiento de residuos mediante la integración de procesos termoquímicos y biológicos ofrece soluciones sostenibles para la producción de energía y la mejora de suelos. El hidrocarbón obtenido por carbonización hidrotermal se ha identificado como un material con múltiples funciones: puede estabilizar el pH, retener nutrientes, favorecer el equilibrio microbiano en digestión anaerobia y mejorar la accesibilidad enzimática de biomasa lignocelulósicas, lo que se traduce en mayores rendimientos de metano y menor inhibición por compuestos tóxicos. En comparación con el biocarbón, este material presenta relaciones H/C y O/C más altas, así como menor área superficial y porosidad, lo que condiciona su desempeño tanto como fuente energética como enmendador agrícola. Estudios recientes señalan efectos positivos en la retención de agua, la germinación y la disponibilidad de nutrientes. En este trabajo se produjo hidrocarbón a partir de bagazo y vinaza de agave en un reactor solar de carbonización hidrotermal, y posteriormente se evaluó su aplicación en la digestión de residuos cárnicos. Los resultados mostraron una producción potencial de 37.95 mL CH₄/g SV de residuos SG con el 3% de HC en comparación con 12.65 mL CH₄/g SV sin HC así como un digestato con mayor capacidad de retención de nutrientes, lo que evidencia el potencial del hidrocarbón solar como promotor bioenergético y enmendador de suelos dentro del marco de la bioeconomía circular.

PALABRAS CLAVE: Hidrocarbón, Energía solar térmica, carbonización hidrotermal, digestión anaerobia, biogás.

1. INTRODUCCIÓN

La valorización de residuos representa un desafío ambiental que requiere el estudio de sinergias entre diferentes tecnologías. Por un lado, las tecnologías termoquímicas han adquirido gran relevancia técnica como estrategia para transformar biomasa residual seca o húmeda en biocarbón (BC) o hidrocarbón (HC) y sus respectivos coproductos. Por otro lado, en cuanto a la remoción de compuestos orgánicos, la digestión anaerobia (AD) es una tecnología madura y consolidada, sin embargo, su integración con procesos termoquímicos como la carbonización hidrotermal (HTC) es un campo emergente [1] como parte de las soluciones eficientes para mitigar el impacto ambiental las prácticas inadecuadas de manejo de residuos.

Estudios previos han demostrado que la incorporación del HC en la AD produce notables beneficios. Entre ellos destacan la mejora en la capacidad amortiguadora del pH, la mitigación de los inhibidores del proceso, la inmovilización de las células microbianas y retención de nutrientes, lo que en conjunto conduce a una mayor producción de biogás [2]. Asimismo, se ha observado que la presencia de HC puede influir en la dinámica microbiana y en las rutas metabólicas [3],[4], lo que refuerza su potencial significativo para integrarse en sistemas de DA.

La adición de HC resulta especialmente prometedora cuando se trabaja con biomasa lignocelulósica. Sus componentes primarios -celulosa, hemicelulosa y lignina- funcionan como fuentes de carbono para los microorganismos anaerobios y portadores para las bacterias





hidrolíticas. De forma complementaria, el HC puede mitigar los efectos inhibitorios causados por el amoníaco; sin embargo es necesaria mayor investigación en esa área para mejorar la comprensión en los mecanismos y optimizar su aplicación en la AD.

Simultáneamente, el proceso de HTC aporta ventajas significativas como pretratamiento de la biomasa. Este método de conversión termoquímica se realiza en un sistema cerrado con agua saturada como medio de reacción a altas presiones (<20 bar) y temperaturas moderadas (180°C a 250°C), en contraste que requiere de temperaturas elevadas por encima de los 550°C. La HTC no implica una combustión, y por lo tanto se considera un proceso de carbono-neutral. Además, permite retener entre el 60 y 84% del carbono presente en la biomasa cruda, en comparación con un 50% del BC [5].

Por otro lado, una vez que la biomasa es sometida al proceso de HTC, el pretratamiento térmico asegura la estabilidad del proceso y la degradación de la estructura sobre todo en biomásas recalcitrantes, lo cual trae consigo dos beneficios principales, el incremento del área superficial específica (SSA) y la accesibilidad de la celulosa para las enzimas [5].

A diferencia del BC, el HC presenta mayor relación H/C y O/C, pero menor porosidad y SSA. Estas características influyen tanto en su desempeño como biocombustible como en su potencial para aplicaciones en suelo. Aunque el BC ha sido ampliamente estudiado como enmienda agrícola, se presume que el HC podría generar efectos similares debido a su elevado contenido de carbono.

En el ámbito agrícola, se ha reportado que la adición de HC al suelo (en torno al 5 %) puede inducir efectos positivos de corto plazo en propiedades fisicoquímicas como germinación, retención de agua y disponibilidad de nutrientes [6]. Sin embargo, otros estudios señalan que en ciertos cultivos el HC puede inhibir temporalmente la germinación debido a la descomposición microbiana [7].

En conjunto, estas evidencias posicionan al hidrocarbón como un material versátil con potencial dual: mejorar la estabilidad y productividad de la digestión anaerobia y contribuir a la fertilidad del suelo, apoyando así la transición hacia sistemas más sostenibles en el marco de la bioeconomía circular.

Los beneficios de la sinergia tecnológica de transformación de residuos son amplios, pero aún con ello existe una alta demanda energética de las dos alternativas, por lo cual en este trabajo utilizó la energía solar como fuente de energía para la carbonización hidrotermal de

bagazo (BA) y vinaza de agave (VA) en un reactor de HTC Solar a 250°C por 15 minutos con una relación de 8:1 en v/v.

El HC obtenido fue adicionado (en un 3% y 15% de v/v) a un sistema de digestión anaerobia de residuos cárnicos sangre (SG), vísceras (VS) y rumen (RM) a través de un ensayo de Potencial Bioquímico de Metano (BMP), a 35°C +/- 1°C durante un TRH de 15 días con un 8% de S.T. Teniendo como resultados principales la obtención de un biogás con 33.56% de CH₄ y 33.85% de CO₂ de los residuos SG con una mejora en la producción de metano tras la adición de HC-250_15 a 46.23% de CH₄ y 48.77% de CO₂. Además de la obtención de un digestato rico en nitrógeno con potencial aplicable como enmendador de suelos.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Caracterización fisicoquímica de la biomasa

El bagazo (AB) y vinaza (VAB) de agave fueron obtenidos de una mezcalera de la comunidad de Tixtla, Guerrero, para la codigestión se utilizaron diferentes sustratos, el inóculo utilizado proviene de una granja casera en Tlalpan, CDMX y los residuos cárnicos RM, SG y VC de un rastro de la comunidad de Ixmiquilpan, Hidalgo.

El bagazo y sargazo fueron secados a 60°C, mientras que las biomásas húmedas RM, SG y VS fueron trituradas y almacenadas a -4°C hasta su uso.. Se determinó el contenido de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) humedad y contenido de cenizas, siguiendo el protocolo establecido por NREL/TP-510-42622. La humedad se calculó indirectamente a partir del contenido de sólidos. Todos los análisis se realizaron por duplicado y se expresaron como porcentaje del peso inicial. La medición de pH se realizó con un potenciómetro.

El análisis microestructural y la composición química de la vinaza y el bagazo fue determinado usando imágenes de un Scanning Electron Microscope (SEM-EDS).

La cantidad de carbohidratos y lignina estructurales del AB y VAB se determinaron con una cromatografía líquida de alta resolución - HPLC del laboratorio de biorefinería de la UAdeC, equipado con una columna Shodex sugar SP0810 forma iónica H⁺/CO₃. El HC se analizó por termogravimetría



(TGA) y análisis de primera derivada (DTG) de los compuestos de partida y los bioadsorbentes resultantes para estudiar el comportamiento de degradación en relación con la temperatura, en un rango de 0 °C a 850 °C.

2.2. Experimental setup

2.2.1 Arreglo experimental HTC Solar

La HTC se realizó en un reactor solar de acero inoxidable de 104 ml a 10% wt de concentración de biomasa. El reactor fue sellado con un sello de cobre y calentado en el horno solar HosIER del IER-UNAM, Temixco. Morelos.

El sistema HosIER consta de un heliostato compuesto de 30 espejos de aluminio integrados a un seguidor solar controlados vía software (SCADA). El concentrador consiste en un arreglo de 409 espejos hexagonales, alcanzando un pico de concentración de 18,000 kW/m².

El reactor fue montado en una mesa de trabajo móvil que lo posiciona en el punto focal del concentrador. El flujo radiativo es controlado por un atenuador tipo persiana con una apertura de 20 a 25% durante las pruebas experimentales, que se realizaron con un rango de DNI de 700 a 850 W/m².

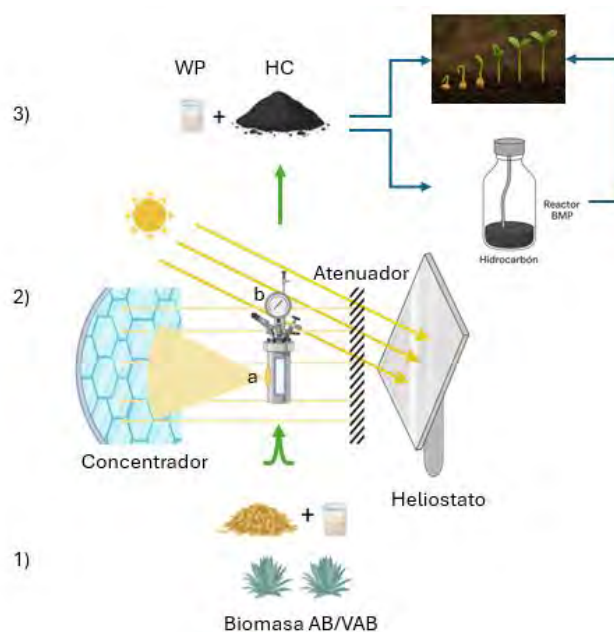


FIGURA 1. Arreglo experimental para HTC, HosIER. Etapa 1. Carga de biomasa, Etapa 2. Arreglo experimental HosIER, a) zona focal, b) reactor HTC y sensores. Etapa 3. Obtención y aplicación de agua de proceso (WP) y HC.

El reactor cuenta con sensores de temperatura (termopar tipo K), presión (transductor de presión) y radiación (pirheliómetro).

La HTC del BA/VAB se llevó a cabo a 250°C con un tiempo de retención (R_T) de 15 minutos en una relación de 8:1. El enfriamiento se realizó por convección natural y no fue considerado como R_T .

2.2.2 Ensayo BMP

Para el estudio del potencial energético del HC se realizó un ensayo de BMP, el ensayo tipo batch se realizó por triplicado, en reactores de 100 ml con agitación por vibración en un rango mesofílico de 35°C con 10 gST. Los sustratos pretratados fueron usados directamente sin lavado o ajuste de pH.

Se realizó un lavado de Argón por 3 minutos en cada reactor, para asegurar las condiciones anaerobias de biodigestión y se realizaron pruebas de fugas y hermeticidad previo a la puesta en marcha.

Se realizaron dos ensayos BMP, en el primero se añadieron RM, SG, y VC con el inóculo, para estimar la producción potencial de metano sin la adición del HC, estas condiciones se resumen en la Tabla 1. Posteriormente, en el

Tabla 1. Arreglo experimental de ensayo de potencial bioquímico de metano.

Clave del ensayo	Cosustratos	Relación en masa (%)	Peso (g)
R1	RM	40	3.88
	Inóculo	60	5.42
S1	SG	30	2.46
	Inóculo	70	5.74
V1	VC	45	3.87
	Inóculo	55	4.73
R2	RM	40	3.92
	Inóculo	45	1.47
	HC-250_15	15	4.41
S2	SG	35	2.91
	Inóculo	50	1.25
	HC-250_15	15	4.15
VS	VC	33	2.79
	Inóculo	65	0.22
	HC-250_15	3	5.59

segundo ensayo se añadió el hc de AB/VA a cada una de las condiciones del primer ensayo, como se resume en la Tabla 3.

La producción diaria de biogás se midió por el método volumétrico por desplazamiento. El biogás obtenido se analizó mediante el uso de un cromatógrafo de gases Agilent 7890 instalado con detector de ionización de llama (FID) para el análisis de ácidos acéticos, propiónico, isobutírico, acetonas, metanol y etanol; detector de conductividad térmica (TCD) con columna HP-PLOT/Q para determinar la composición del biogás (CH₄, CO₂, H₂).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización de sustratos

El análisis de lignina y carbohidratos estructurales de los residuos de agave indican que el AB contiene: 18.9% de Celulosa, 8.38% de hemicelulosa, 27.73% de lignina, 18.19% de glucanos, 6.7% de xylanos, 1.07% de ácido acético y 0.60% de arabinosa. Los resultados del análisis próximo se muestran en la tabla 2, donde se observa que el contenido de sólidos volátiles es mayor a lo esperado, lo que indica que las condiciones de carbonización fueron poco severas y la formación de compuestos secundarios volátiles.

En el análisis último se observa la presencia de minerales K, Ca, Mg y P tanto en AB como en VAB que actúan como catalizadores inorgánicos en la HTC para promover la formación de HC.

3.3 TGA

El análisis termogravimétrico fue usado para determinar las características combustibles del HC-250_15, con este análisis se pudo observar que hay una pérdida de masa inicial debida a la evaporación alrededor de los 120°C y una descomposición térmica propia de los residuos e hidrocarburos, previa a los 200°C, sin embargo, se observa que en este caso el HC el patrón del segundo pico de degradación que corresponde a la

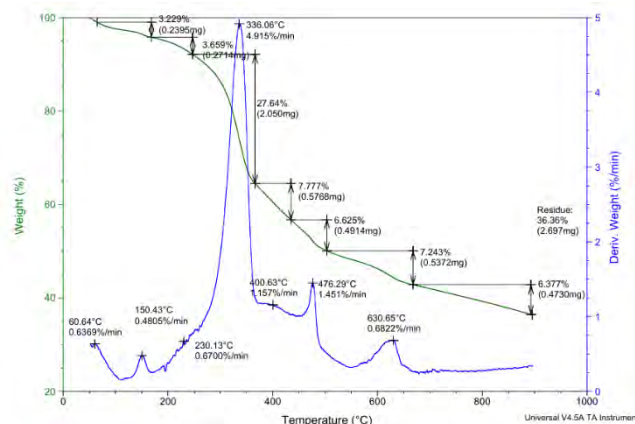


FIGURA 2. Análisis termogravimétrico del HTC-250_15.

Reducción de la materia volátil no es tan marcado como se observaría en hidrocarburos más estables. Por lo anterior este tipo de hidrocarburos, no estabilizados, logrado a un bajo tiempo de retención, se adecuaba para el uso en un ensayo BMP y no para su uso directo como combustible.

TABLA 3. Análisis último de la biomasa utilizada (%)

	BA	VAB
Ca	37.9	36.8
O ₂	39.5	33.7
K	5.03	9.38
Mg	4.15	5.85
C	6.42	3.09
Fe	2.82	4.9
S	1.73	3.03
P	1.25	1.58

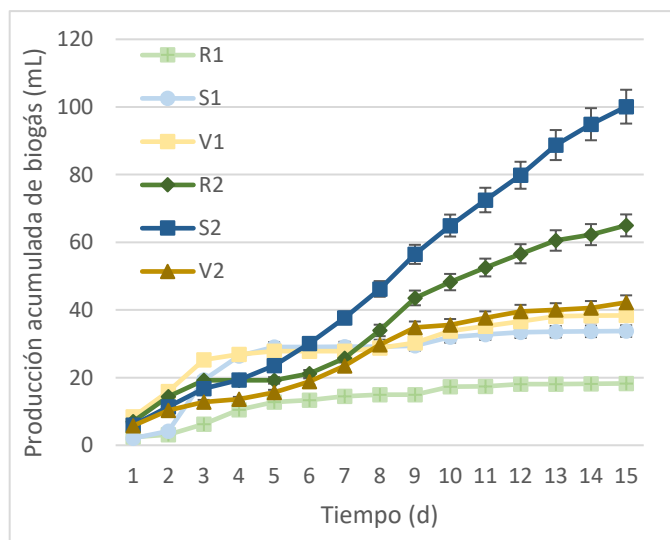
TABLA 2. Análisis próximo de la biomasa utilizada (%wt, peso seco)

	BA	VAB	RM	SG	VS	Inóculo	HC-250_15	Biocarbón
Sólidos totales	17.9	3	16.7	63.1	26.4	29.3	17.9	-
Húmedad	80.7	96	79.8	58.4	64.1	73.3	4.6	2.5
Cenizas	5.47	5.85	4.9	0.1	0.4	0.9	8	44.61
Sólidos volátiles	19.5	4.5	68.3	41.9	48.5	58.6	21.3	-
pH	-	3.4	7	7.5	7.2	8	5	9.33

3.4 Potencial Bioquímico de Metano

La producción acumulada de biogás de cada sustrato se restó de la producción del blanco, lo cual se ilustra en la figura 5. En la tabla 6 se muestran los resultados de la cromatografía de gases para ambos ensayos.

Los tratamientos evaluados presentaron variabilidad en la producción diaria de biogás, siendo más evidente entre los días 2 y 5. R1 mostró la menor producción acumulada, pero con mayor estabilidad entre réplicas. En contraste, S2 tuvo el mayor volumen de biogás y el mayor contenido de metano (46.23%), en contraste con S1 (38.85%) lo cual indica una mayor calidad del gas generado. El monitoreo del pH evidenció que S1 mantuvo valores más estables, lo que sugiere un entorno favorable para la digestión anaerobia. Sin embargo, se observó una mayor estabilidad de valores pH con la adición de HC, siendo el menor valor 7.2 en la etapa hidrolítica (días 2-4) y 7.5 en la etapa metanogénica (día 15).



La adición de hidrocarbón (HC) en la segunda etapa del experimento promovió mejoras significativas en la producción y calidad del biogás. R2 y V2 alcanzaron proporciones de metano similares, 44.45% y 44.81% respectivamente, mientras que el análisis del potencial bioquímico de metano (BMP) reveló una mayor eficiencia de conversión en S2. La condición que mostró un menor potencial de conversión de metano fue R1 con 2.42 ml CH₄/g SV en contraste con el ensayo de mayor conversión S2 de 37.95 ml CH₄/g SV.

Tabla 4. Análisis de calidad y cantidad de biogás, BMP.

Ensayo	Biogás acumulado (mL)	CH ₄	CO ₂	Otros gases (H ₂ , N ₂ , O ₂)	mL CH ₄ /g SV
R1	18.07	35.53	53.76	<10%	2.42
S1	33.56	38.85	58.73	0-5%	12.65
V1	38.17	26.45	36.69	<30%	5.38
R2	64.99	44.45	55.55	0-5%	10.79
S2	100.09	46.23	53.77	0-5%	37.95
V2	42.20	44.81	55.19	0-5%	13.97

La codigestión en este caso, ha demostrado incrementar la producción de biogás incluso con co-sustratos de bajo contenido orgánico, mientras que temperaturas elevadas reducen el metano por reacciones secundarias. A bajas temperaturas de carbonización, la fracción orgánica del HC permanece disponible y favorece su aprovechamiento en digestión anaerobia. Además, la adición de HC o retrasa la acumulación de ácidos grasos volátiles y promueve la transferencia directa de electrones, mejorando la tasa y eficiencia de producción de metano.

La aplicación del HC obtenido por carbonización hidrotermal mostró un efecto positivo en todos los sustratos probados. Con un 15% en masa para residuos de rastro y sangre, y 3% rumen, se observaron incrementos sustanciales tanto en la producción como en el contenido de metano. Aunque el aumento en volumen fue modesto en el caso de la vinaza, el contenido de CH₄ aumentó considerablemente, evidenciando una mejora en la calidad energética del biogás.

6. CONCLUSIONES

En conclusión, la incorporación de hidrocarbón en la digestión anaerobia de diversos residuos orgánicos no solo mejora el rendimiento de biogás, sino que también optimiza su calidad, posicionándose como una estrategia eficiente y sostenible para el tratamiento de residuos agroindustriales. Es necesaria una mayor profundización en los estudios de aplicación de las aguas de proceso, así como del favorecimiento para el acondicionamiento de suelos.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo técnico de J.J Quiñones Aguilar por la operación y mantenimiento del horno solar del IER. A Patricia Altuzar por el análisis TGA. Al Dr. Arturo Azpiazú Méndez por la asistencia en la cromatografía. Al Dr. Sergio A. Gamboa por su asistencia y uso del laboratorio de Hidrógeno y al Dr. Raúl Suárez Parra por el uso del laboratorio de nanoestructuras.

REFERENCIAS Y NOTAS DE PIE DE PÁGINA

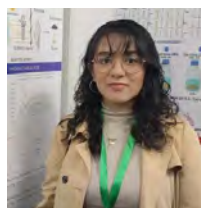
REFERENCIAS

Artículos

- [1]. Mannarino G, Sarrion A, Diaz E, Gori R, De la Rubia MA, Mohedano AF, *Improved energy recovery from food waste through hydrothermal carbonization and anaerobic digestion*. Waste management 142:9-18 (2022). 10.1016/j.wasman.2022.02.003.
- [2]. Abdoli MA, Ghasemzadeh R, *Evaluation and optimization of hydrothermal carbonization condition for hydrochar and methane yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste* Molino production by anaerobic digestion of organic waste. Fuel 355:129531 (2024) 10.1016/j.fuel.2023.129531.
- [3]. Weber B, Estrada-Maya A, Sandoval Moctezuma Ac, Martínez-Cienfuegos IG, *Anaerobic digestion of extracts from steam exploded Agave tequilana bagasse* J Environmental Management 245:489-495 (2019) 10.1016/j.jenvman.2019.05.093.
- [4]. Wang C, Liu Y, Gao X, Chen H, Xu X, Zhu L, *Role of biochar in the granulation of anaerobic sludge and improvement of electron transfer characteristics*, Bioresource Technology 268:28-35 (2018) 10.1016/j.biortech.2018.07.116.
- [5]. Bansod SP, Makwana K, Sarangi PK, Parikh JK, *Advanced pretreatment processes for lignocellulosic biomass to biofuels production: Path towards circular bioeconomy*, Sust Chemistry and Pharmacy 39:101514 (2024) doi.org/10.1016/j.scp.2024.101514.
- [6]. De Jager M, Röhrdanz M, Giani L, *The influence of hydrochar from biogas digestate on soil*

improvement and plant growth bioeconomy, Biochar 2:177-194 (2020) doi.org/10.1007/s42773-020-00054-2.

- [7]. Bargman I, Rillig MC, Kruse A, Greef JM, Kücke M, *Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability* J. Plnat Nutr. Soil Sci 177:48-58 (2014) 10.1002/jpln.201300069.



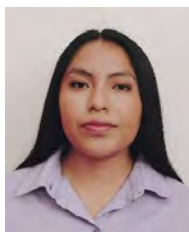
Gabriela Ruiz Rendón. Es candidata a doctora por el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM) del programa de posgrado en ingeniería en energías. Maestra en ingeniería e Ingeniera en energías renovables por el IER-UNAM.

En 2021, fue galardonada con el primer lugar en tesis de licenciatura por la Fundación UNAM y el grupo financiero AFIRME, en el área de impacto de las energías renovables en el estilo de vida de las personas.. Sus principales líneas de investigación se centran en el tratamiento y pretratamiento de residuos para la obtención de bioenergéticos bajo el concepto de biorrefinería, con el objetivo de integrar procesos sustentables y energías renovables, como la concentración solar.



Lorena Palma Vazquez. Es ingeniera en Energías renovables, egresada de la Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital (UTVM), con especialización en Ahorro y Calidad de la Energía. Entre 2024 y 2025 realizó una estancia de investigación en el IER-UNAM, donde desarrolló un proyecto enfocado en la evaluación de potencial bioquímico de metano y diseños de incubación

a partir de biomasa residual y en estudio de procesos de digestión anaerobia. En 2025 se incorporó a Grupo Apolo Solar, empresa en la que actualmente se desarrolla como gerente de ingeniería.



Teresa González Nava. Es ingeniera química con especialidad en ambiental, egresada del Instituto Tecnológico de Zacatepec. Realizó sus residencia profesional en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, con el grupo de concentración solar en un reactor de licuefacción, realizando un proyecto de investigación el cual consiste en caracterizar hidrocarburos utilizando biomasa

de sargazo, con fines de utilizarlo como mejorador de suelos.





Heidi Isabel Villafán Vidales. es investigadora titular A del Instituto de Energías Renovables-UNAM (IER- UNAM). Es Ingeniera Química por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y doctora en Ingeniería en Energía por la UNAM. Del 2009 al 2011 fue investigadora postdoctoral en dos instituciones: Procédés, Matériaux et Énergie Solaire del Centre National de la Recherche Scientifique (PROMES-CNRS, Francia) y la Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa. Desde el 2024 es investigadora Nivel II del Sistema

Nacional de Investigadores. Sus líneas de investigación son: reactores solares, procesos termoquímicos solares y concentración solar.





Obtención de colorante a partir de pétalos de *Tagetes erecta* L. para su utilización en celdas solares sensibilizadas por colorantes

A. E. OLGUIN VERDUZCO¹, O. D. ARMENDÁRIZ IBARRA², J. F. ARMENDÁRIZ LÓPEZ³
M. C. CASTAÑÓN BAUTISTA⁴, R. VIVAR OCAMPO⁵

¹Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, 22260, México

Autor de Correspondencia: Olguin Verduzco Augusto Emiliano (e-mail: augusto.olguin@uabc.edu.mx).

RESUMEN En este trabajo se realizó la extracción de colorante a partir de pétalos de cempasúchil para evaluar su posible aplicación como fotosensibilizante en celdas DSSC. La extracción se llevó a cabo por el método de cromatografía en columna, usando como fase móvil acetato de etilo. El extracto resultante se caracterizó por espectrofotometría UV-vis y se encontró el pico de absorción en los 450 nanómetros. Así, se calculó la energía de banda prohibida, para lo cual se obtuvo un valor de 2.76 eV. De esta forma, se determinó que el colorante extraído del cempasúchil con acetato de etilo cumple en cierta medida el requisito de absorción de luz, sin embargo, son necesarias más pruebas para poder asegurar un desempeño estable dentro de la celda DSSC, tales que se puedan asegurar la presencia de grupos funcionales capaces de anclarse al semiconductor y que evalúen el comportamiento mismo de la celda ya constituida. No obstante, los datos obtenidos del espectro de absorción representan un primer indicio favorable para la aplicación de este colorante en DSSC.

PALABRAS CLAVE: Cempasúchil, luteína, DSSC, cromatografía en columna, colorante.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento demográfico y tecnológico de los últimos años y al subsecuente consumo mayor de energía, las fuentes limitadas de combustible fósil, como lo son petróleo, gas y carbón, con las cuales la sociedad moderna venía impulsando su desarrollo, se han visto comprometidas hasta extremos que comprometen la salud ambiental. Ante la reducción de las reservas de combustible fósil, los métodos de extracción se han vuelto cada vez más intrusivos y dañinos, mientras que el uso de estos combustibles continúa

agravando el efecto del cambio climático y el calentamiento global [1].

Frente a este panorama, la implementación de energías renovables a los sistemas de generación resalta como principal alternativa remediadora. En especial, la energía solar fotovoltaica destaca por su potencial inagotable, de bajo costo y de alta disponibilidad. La radiación solar se puede aprovechar para generar electricidad por medio de módulos fotovoltaicos, los cuales están compuestos por celdas solares. Existen diferentes tipos de celdas solares, dependiendo su proceso de fabricación, características y partes que la componen, se clasifican en cuatro generaciones. En orden ascendente se tienen: películas cristalinas gruesas, películas delgadas, tecnologías emergentes e híbridos [3]. Las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) pertenecen a la tercera generación de celdas solares y fueron abordadas por primera vez en 1991 por O'Regan y Grätzel [4]. Las DSSC consisten en un sustrato de vidrio hecho de óxido conductor transparente, un foto-ánodo, un foto-sensibilizador, un electrolito y un cátodo [5]. En particular, el foto-sensibilizador posee importancia capital, al ser el encargado de asegurar altas tasas de transferencia de electrones gracias a su absorción de fotones. Un foto-sensibilizador debe cumplir ciertos requisitos, los cuales son, una fuerte adsorción hacia la superficie del semiconductor, alta capacidad de absorber luz visible, habilidad para inyectar electrones hacia la banda de conducción del semiconductor y presencia de grupos funcionales capaces de anclarse a la superficie del foto-ánodo para asegurar altas tasas de transferencia de electrones [6].

Los foto-sensibilizadores se pueden clasificar en moléculas de tinte inorgánicas, moléculas de tinte orgánicas y moléculas de tinte metal-orgánicas. Dentro de los cuales,





los mejores en términos de eficiencia y estabilidad han sido aquellos basados en compuestos de rutenio. Sin embargo, la síntesis de tales compuestos implica procesos sofisticados y caros [7]. Del mismo modo, los tintes inorgánicos libres de metales requieren de métodos complejos para su obtención. Por el contrario, los tintes de moléculas orgánicas representan una alternativa de fácil obtención y amigable con el ambiente, al poder extraerse de flores, hojas, raíces, tallos, semillas, etc., y no requerir de técnicas de extracción complejas. No obstante, comparados con los tintes basados en rutenio y los sintéticos, los tintes orgánicos presentan una baja eficiencia como foto-sensibilizador en DSSC. Aun así, los tintes orgánicos poseen un gran potencial por sus propiedades biodegradables, amigables con el ambiente, seguras para la salud y de bajo costo [8].

Diversas fuentes residuales orgánicas han sido registradas como materia prima para la extracción de colorantes y aplicación en DSSC como foto-sensibilizador, se cuentan cáscara de berenjena, bagazo de cereza, bagazo de uva roja, cáscaras de cebolla morada, cáscara de naranja, pétalos de azafrán y cáscara de nuez, por ejemplo [6].

TABLA 1. Distintas fuentes residuales registradas como materia prima para la extracción de colorantes sensibilizantes.

<i>Fuente Residual</i>	<i>Solvente</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Referencia</i>
Cáscara de berenjena	Agua	0.96	[2]
Cáscara de berenjena	Etanol	1.49	[2]
Bagazo de cereza	Agua	0.75	[2]
Bagazo de cereza	Etanol	1.23	[2]
Bagazo de uva	Agua	0.63	[2]
Bagazo de uva	Etanol	1.12	[2]
Hojas de limón	Etanol	0.28	[2]
Cáscara de cebolla morada	Etanol	0.14	[2]
Pétalos de azafrán	Etanol acidificado	0.66	[6]
Cáscara de naranja	Etanol	0.54	[6]

El cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) es una planta herbácea nativa de México y Centroamérica, ampliamente

cultivada por su valor cultural y medicinal. Su característica principal, así como el atractivo para este trabajo, es la coloración distintiva de sus flores, las cuales pueden ser desde amarillo intenso hasta anaranjado. De acuerdo con el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, al año 2024 la producción total de cempasúchil, a nivel nacional, fue de 20, 659.19 toneladas, mientras que, en Baja California, durante el ciclo agrícola primavera-verano 2024, se establecieron un total de 19 hectáreas con flor de cempasúchil, lo cual indica su alta disponibilidad para ser aprovechado [9, 10]. Si a estas cifras se le añade el hecho de que la mayoría de estas flores son destinadas para las festividades de Día de Muertos, para después ser desechadas, se introduce el manejo de residuos.

La coloración de las flores de cempasúchil se debe principalmente a la presencia de carotenoides y flavonoides, un grupo de pigmentos conocidos por sus múltiples aplicaciones en diferentes áreas, como la salud, farmacéutica y pecuaria [11]. En específico, son las moléculas luteína y zeaxantina son las que se encuentran en mayor concentración y que aportan al color de los pétalos de cempasúchil, siendo que absorben en las regiones azul y verde del espectro electromagnético visible [12].

Patel H. extrajo eficazmente colorante a partir de los pétalos de cempasúchil, utilizando tres solventes de diferente polaridad, agua desionizada, acetónitrilo y hexano, logrando su aplicación en DSSC, así como sus respectivas caracterizaciones. De tal manera, obtuvo los mejores resultados con el extracto de hexano, comprobando que son los solventes apolares los que mejor extraen las moléculas receptoras de luz presentes en los pétalos de cempasúchil [13].

Con base en la breve revisión bibliográfica, se ha encontrado que la luteína de los pétalos de cempasúchil, así como sus demás constituyentes, pueden ser extraídos y aplicados eficientemente como foto-sensibilizadores en DSSCs, si se utilizan solventes no polares para la extracción. Por lo tanto, en este trabajo se investigó la viabilidad de usar acetato de etilo como solvente para la extracción de colorante de cempasúchil.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

La extracción del colorante se realizó por el método de cromatografía en columna, la cual consiste en la separación de los componentes de una muestra según la interacción de estos con una fase estacionaria y una móvil. La técnica se



realiza en una columna, en la cual primero se coloca la fase estacionaria y, sobre ésta, la muestra previamente adecuada. Por último, se hace pasar a través de la columna y todo su contenido uno, o varios, solventes (fase móvil), para recoger las distintas fracciones de interés resultantes.

2.1. Pretratamiento de la materia prima

Las flores de cempasúchil fueron obtenidas en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Unidad Valle de las Palmas, de la Universidad Autónoma de Baja California, México, tras las celebraciones de Día de Muertos, durante noviembre del año 2024.

Las flores fueron mantenidas selladas en un lugar fresco hasta su utilización. Se les retiró el tallo para conservar solo los pétalos, los cuales fueron lavados con agua para dejarlos secar a temperatura ambiente. Posteriormente, se deshidrataron en un deshidratador solar, propiedad de colegas de la facultad, a 50 °C durante todo un día. Se pesaron 5 gramos de pétalos secos, para molerlos en mortero hasta obtener un polvo fino.

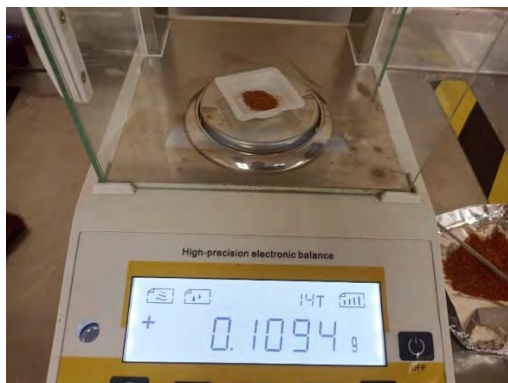


Figura 1. Masa de polvo de cempasúchil empleada para la extracción.

2.2. Preparación de la fase estacionaria

La extracción del colorante se llevó a cabo en una columna de cromatografía. En el fondo de la columna se agregó un pequeño tapón de algodón, de 0.3 cm de altura, seguido de 1 g de gel de sílice para cromatografía. Toda la columna se compactó con una bomba de vacío manual para lograr uniformidad a lo largo de la columna y una superficie plana sobre el gel de sílice.

2.3. Preparación de la muestra

Se pesó 0.1 g de polvo de pétalos de cempasúchil y se depositó en un pequeño mortero, junto con 1 g de gel de sílice. A la mezcla se añadió 1 mL de acetato de etilo y se

incorporó todo en el mortero, hasta obtener un polvo homogéneo semi húmedo.

2.4. Extracción por cromatografía

La muestra se añadió a la columna de cromatografía ya preparada, seguido de un último tapón de algodón. Por último, se vertieron 10 mL de acetato de etilo a la columna, según el solvente iba pasando a través de la columna se vertía un poco más del solvente hasta terminar con los 10 mL.

El extracto obtenido se recolectó en un frasco ámbar y se mantuvo en un lugar fresco hasta su utilización.



FIGURA 2. Columna cromatográfica preparada para la extracción.



FIGURA 3. Columna cromatográfica durante la extracción.

3. RESULTADOS

Se obtuvieron partículas secas a partir de los pétalos de la flor de cempasúchil. Los pétalos frescos fueron sometidos a

un proceso de secado utilizando un desecador solar. Este método permitió la deshidratación controlada, asegurando la conservación de las propiedades del material. Las partículas resultantes, una vez secas, mostraron un tamaño que varió entre 200 y 500 μm .

Las partículas secas se almacenaron en condiciones adecuadas para su posterior uso. El tamaño de partícula obtenido es óptimo para los procesos de maceración y extracción de colorantes, facilitando la liberación de los compuestos de interés presentes en los pétalos. Los resultados preliminares indican que este método de secado y preparación es eficiente para la obtención de material base con alto potencial para la extracción de pigmentos naturales.

El extracto resultante se caracterizó por espectrofotometría UV-Vis, para comprobar su absorción de luz. Los resultados se muestran en la figura 4.

De igual forma, con el dato de la longitud de onda donde se encontró el pico de absorción, se calculó la energía de banda prohibida:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

A medida que este valor obtenido sea menor, se logrará asegurar una alta tasa de transferencia de electrones, pues se requiere menos energía para que los electrones realicen la transición de la banda de valencia a la banda de conducción.

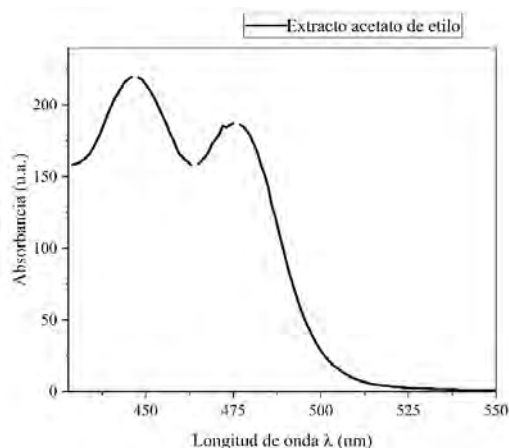


Figura 4. Espectro de absorción de extracto de cempasúchil con acetato de etilo

El extracto de cempasúchil analizado por espectrofotometría UV-Vis mostró un rango de absorción entre las longitudes de 400 nm y 500 nm, con el pico de absorción en la longitud de 450 nm.

Tabla 2. Resultados obtenidos.

Extracto	Cempasúchil
Solvente	Acetato de etilo
Pico de absorción (nm)	450
Rango de absorción (nm)	400 – 500
Banda prohibida (eV)	2.76

4. CONCLUSIONES

Las flores de cempasúchil poseen potencial para ser utilizadas como materia prima en la extracción de foto-sensibilizadores naturales para su aplicación en DSSC, en especial si se utilizan solventes apolares, los cuales son capaces de separar las principales moléculas fotorreceptoras: la luteína y sus diversas formas. Si los pétalos son adquiridos en forma de desechos se lograría revalorizar como residuo, disminuyendo los costos de producción, así como los desperdicios generados.

Actualmente los proyectos deben incorporar variables que se adapten a condiciones naturales, sociales, culturales y económicas que faciliten su apropiación. En el caso del cempasúchil, se tiene una carga social y cultural importante desde tiempos prehispánicos, asimismo es un recurso natural ampliamente utilizado en México lo que facilita su adquisición e investigación.

Si bien el extracto obtenido presenta absorción dentro del espectro visible, en el rango de 400 a 500 nm, así como una energía de banda prohibida ligeramente baja, de 2.76 eV, son necesarias más pruebas de caracterización para poder determinar de manera eficaz el rendimiento real del extracto como foto-sensibilizador. Es menester confirmar la presencia de grupos funcionales dentro del extracto que aseguren un correcto anclaje de sus partículas a las del semiconductor, así como el comportamiento y las propiedades fotoeléctricas de la celda ya construida. Sin embargo, estos primeros datos obtenidos representan un primer indicio



prometedor de la posible aplicación del cempasúchil como materia prima para la extracción de foto-sensibilizadores.

REFERENCIAS

- [1]. Letcher, M. (2021). Global Warming-a complex situation. Climate Change (Third edition). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00001-3>
- [2]. Hosseinneshad, M., Gharanjig, K., Ghahari, M., Nasiri, S., & Fathi, M. (2024). Investigation of the use of food waste in renewable energy production: Extraction, fabrication and characterization of natural photosensitizers in DSSCs. Sustainable Energy Technologies and Assessments. doi:10.1016/j.seta.2024.104066
- [3]. Pastuszak, J., & Wegierek, P. (2022). Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development. materials. doi:<https://doi.org/10.3390/ma15165542>
- [4]. O'Regan, B. & Grätzel, M. (1991). A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. Nature.
- [5]. <https://doi.org/10.1038/353737a0>
- [6]. Kabir, Fahmid, Manir, Serajum, Hossain, M., Aftab, S., M. Adachi, M. (2022). Instability of dye-sensitized solar cells using natural dyes and approaches to improving stability - An overview. Sustainable Energy Technologies and Assesments. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102196>
- [7]. Hosseinneshad, M., Gharanjig, K., Khodaddadi, M., Zarrintaj, P., Moradian, S., Reza Saeb, M., & J. Stadler, F. (2020). Dye-sensitized solar cells based on natural photosensitizers: A green view from Iran. Journal of Alloys and Compunds. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154329>
- [8]. Qin, Y. & Peng, Q. Ruthenium Sensitizers and Their Applications in Dye-Sensitized Solar cells. (2012). International Journal of Photoenergy. <https://doi.org/10.1155/2012/291579>
- [9]. Mahajan, U., Prajapat, K., Dhonde, M., Sahu, K., & M. Shirage, P. (2024). Natural dyes for dye-sensitized solar cells (DSSCs): An overview of extraction, characterization and performance. Nano-Structures & Nano-Objects. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101111>
- [10]. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- [11]. California, R. A. B. (s/f). Sembraron cempasúchil productores de la Zona Costa de BC. gob.mx. Recuperado el 15 de agosto de 2025, de <https://www.gob.mx/agricultura%7Cbajacalifornia/articulos/sembraron-cempasuchil-productores-de-la-zona-costa-de-bc>
- [12]. Nwachukwu, I. D., Udenigwe, C. C., & Aluko, R. E. (2016). Lutein and zeaxanthin: Production technology, bioavailability, mechanisms of action, visual function, and health claim status. Trends in Food Science & Technology, 49, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.005>
- [13]. Rodrigues, D. B., Mercadante, A. Z., & Mariutti, L. R. B. (2019). Marigold carotenoids: Much more than lutein esters. Food Research International (Ottawa, Ont.), 119, 653–664. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.043>
- [14]. Patel, H., Sharma, S., Singh, S., Srivastav, N., Singh, Y., Rai, A., & Srivastava, P. (2025). Tagetes erecta (marigold) flower extract in the different solvents used as a capping agent and sensitizer for TiO₂ photoanode based DSSC. Next Materials, 8(100875), 100875. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100875>





Caracterización química, física y energética del biochar producido por la pirólisis de bagazo de caña de azúcar

O. Sánchez Castillo, M. G. Vizcarra Mendoza, C. Martínez Vera, S. A. Gómez Torres, E. Rojas García
Área de Ingeniería Química, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa

Autor de Correspondencia: S.A. Gómez Torres (e-mail: sgomez@xanum.uam.mx).

Este trabajo fue financiado por la DCBI-UAM-Iztapalapa bajo el convenio PEAPDI-2025 "Obtención de biochar a partir de la pirólisis de biomasa residual en reactor tubular de lecho fijo"

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es producir biochar a partir de la pirólisis de bagazo de caña de azúcar y plantear aplicaciones energéticas y ambientales a partir de las propiedades determinadas de su caracterización. Actualmente, el biochar se valora como biofertilizante, como adsorbente, como material precursor para obtener carbón activado o para aplicarlo en el tratamiento de aguas. Sin embargo, tanto el rendimiento a biochar y sus características químicas, físicas y energéticas dependen fuertemente del tipo de biomasa y de las condiciones usadas en la pirólisis.

Este trabajo presenta correlaciones del rendimiento y las propiedades específicas del biochar con las variables críticas de operación. Esto permite maximizar el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar e impulsar soluciones sostenibles para la bioenergía y la economía circular.

PALABRAS CLAVE: Bagazo de caña de azúcar; Pirólisis; Biochar, rendimiento energético, valor de calentamiento.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de fuentes sostenibles de energía, impulsada por la creciente demanda global y la limitación de recursos fósiles, ha destacado a la biomasa residual (BMR) o derivada, como una alternativa energética prometedora debido a su abundancia y características [1,2]. En particular, el bagazo de caña de azúcar (BCA), es un subproducto

abundante de la industria azucarera mexicana. En promedio, se producen entre 0.1 y 0.15 ton de BCA seco por una ton de azúcar procesada. En México, la producción de azúcar para la zafra 2024/25 reporta alrededor de 4.6 millones de toneladas de azúcar procesada [1], entonces, la cantidad de bagazo seco de acuerdo a estos datos, se encuentra alrededor de 460 mil ton de BCA seco, el cual, en su mayoría, se utiliza como fuente de energía térmica en los ingenios azucareros. El BCA está compuesto, en promedio, de 45 a 50% de celulosa, 25 a 30% de hemicelulosa, 25% de lignina y de 2 a 9% de cenizas [2]. Debido a la cantidad de celulosa, el BCA puede usarse para la producción de bioenergía, como generador de electricidad, en la industria del papel o como reserva de energía solar [3,4]. Además, puede usarse para producir bioaceite, gases combustibles y biochar por medio de pirólisis, proceso termoquímico que permite convertir la biomasa residual en productos útiles en aplicaciones energéticas, agrícolas y ambientales [1-4].

En particular, el biochar se valora por sus propiedades texturales y ácidas, que favorecen el mejoramiento de suelos, el tratamiento de aguas y su uso como adsorbente selectivo. Sin embargo, tanto el rendimiento como las características del biochar dependen de variables críticas utilizadas durante la pirólisis del bagazo de caña, como la temperatura, el flujo de gas inerte y el tamaño de partícula [5].

El objetivo de este trabajo es producir biochar a partir de la pirólisis del BCA y plantear aplicaciones energéticas y



ambientales a partir de la correlación de sus propiedades fisicoquímicas obtenidas de su caracterización.

Asimismo, se presenta el efecto de las variables del proceso y la cinética de la pirólisis, para obtener correlaciones sobre el rendimiento y las propiedades del biochar respecto a las variables específicas de operación como la temperatura, la tasa de calentamiento, el tamaño de partícula, etc. Este enfoque permite maximizar el aprovechamiento del bagazo, impulsar soluciones innovadoras y sostenibles para la bioenergía y la economía circular.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El bagazo de caña de azúcar (BCA) fue sometido a una serie de etapas de preparación para garantizar su idoneidad durante los experimentos de pirólisis. Primero, la caña de azúcar (CA) fue pelada y cortada en piezas uniformes de 0.8 cm x 3.3 cm, seguido de un prensado a 4 Ton/cm², para la extracción del jugo. El bagazo prensado fue utilizado en experimentos de secado a 40, 60 y 80 °C por 180 min en una termobalanza. La fracción de masa seca se determinó calentando el BCA a 120°C por 180 min, estableciendo la base para el contenido de materia seca [6].

Previo a la pirólisis, el bagazo se secó entonces a 70 °C durante 20 h, se cortó en cubos de 1 mm x 1.5 mm x 1.2 mm, en promedio, y se cargó en el reactor de pirólisis. Posteriormente se realizaron experimentos moliendo el BCA seco a diferentes tamaños de partícula. El reactor de pirólisis, operó a 300, 400, 500 y 600°C por 1 h bajo un flujo constante de N₂ que se varió de 500 a 3000 cm³/min para garantizar ambiente inerte y facilitar la remoción de compuestos volátiles [6]. A partir de pruebas preliminares se encontró que el flujo de N₂ no tiene efecto en las propiedades del biochar. La velocidad espacial, calculada con base en el flujo de N₂ y la masa de BCA seco, fue constante en todos los experimentos e igual a 28 h⁻¹. Los vapores generados se dirigieron a dos condensadores, el primero a 60°C y el segundo a -5°C, donde se recolectó el bioaceite (Figura 1). El biochar, fue recuperado del reactor y se caracterizó por SEM, DRX, adsorción de N₂ y por las espectroscopías IR y Raman.

El rendimiento másico hacia a biochar (y_m) se calculó con la ecuación (1) [6,7], mientras el rendimiento energético (y_e) se obtuvo a partir de la ecuación (2) y el rendimiento a carbón fijo (y_{cf}) por la ecuación (3) [7].

$$y_m = \frac{m_{Biochar}}{m_{BCA}} 100 \quad (1)$$

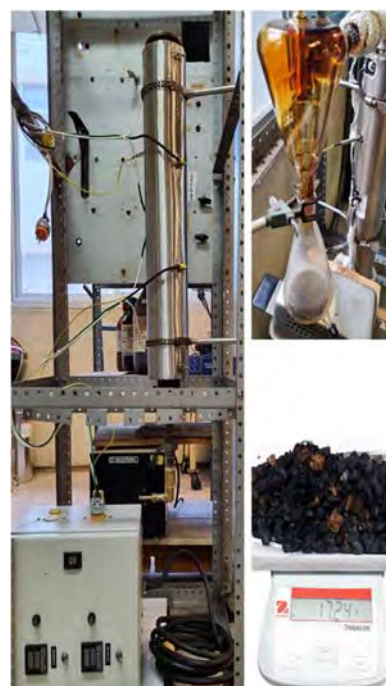


Figura 1. Reactor de pirólisis (a), condensador de bioaceite (b) y biochar (c).

$$y_e = y_m \frac{LHV_{Biochar}}{LHV_{BCA}} \quad (2)$$

$$y_{cf} = y_m \frac{m_{cf \text{ biochar}}}{m_{cf \text{ BCA}}} \quad (3)$$

En la ecuación (2), LHV corresponde a las siglas en inglés del valor bajo de calentamiento. Estos fueron obtenidos apartir de la metodología de Weber y Quicker [7], y presentaron valores entre 23 y 37 MJ/kg; las masas de carbón fijo (cf) para el biochar y para el BCA se midieron por medio de análisis químico elemental de las muestras.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como ya se ha mencionado, el biochar es el producto sólido de la pirólisis. La cantidad producida depende de las condiciones de pirólisis, en particular el tamaño de partícula

y la temperatura [2,4,6], pues estas afectan los procesos de descomposición del BCA.

Los resultados obtenidos en función de la temperatura de pirólisis se presentan en la Figura 2.

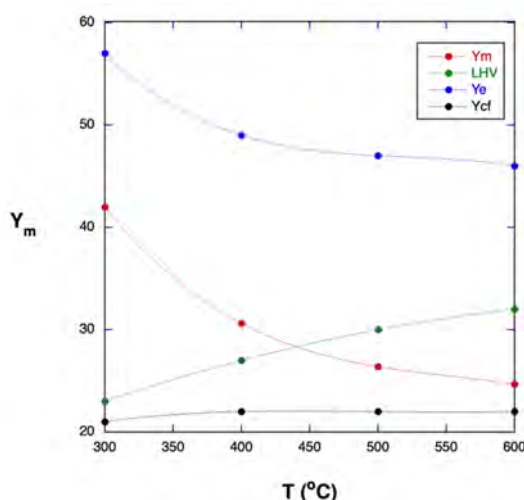


Figura 2. Comportamientos del LHV y de los rendimientos másico (y_m), energético (y_e) y de carbón fijo (y_{cf}) en función de la temperatura de pirólisis.

En la Figura 2 se puede observar que tanto los rendimientos másico (y_m) como el energético (y_e) disminuyen al aumentar la temperatura de pirólisis. La disminución de y_m es notable, disminuye hasta 40% en el rango de temperatura estudiado. Esto está de acuerdo con la literatura que indica que a medida que la temperatura aumenta, la calidad del biochar aumenta debido a la mayor descomposición de la biomasa con la temperatura [2,4,6,7]. Por otro lado, el rendimiento energético (y_e) indica cuanto del contenido energético en el BCA permanece en el Biochar. De acuerdo con la ecuación (2) la dependencia del rendimiento energético con el másico es lineal y la pendiente depende de los LHV los materiales y la temperatura (Figura 3). El poder calorífico inferior (LHV) del biochar aumenta con la temperatura de pirólisis. Esto se refleja en la concentración de carbono fijo en el sólido. Según reportes [4, 7], la energía específica del biochar asciende de 15–20 MJ/kg (BM) hasta 25–30 MJ/kg al carbonizar entre 250 – 350 °C, alcanzando 30–35 MJ/kg a temperaturas más altas. Nuestros biochars siguen esta tendencia: por ejemplo, se estimó un LHV de 23 MJ/kg a 300 °C, aumentando a 32 MJ/kg a 600 °C. El aumento más

pronunciado ocurre entre 300 – 400 °C, donde la pérdida de compuestos oxigenados eleva significativamente el contenido energético del biochar. Más allá de 400 °C, el LHV se incrementa de forma moderada conforme el material se aproxima a una composición similar a la de carbón mineral.

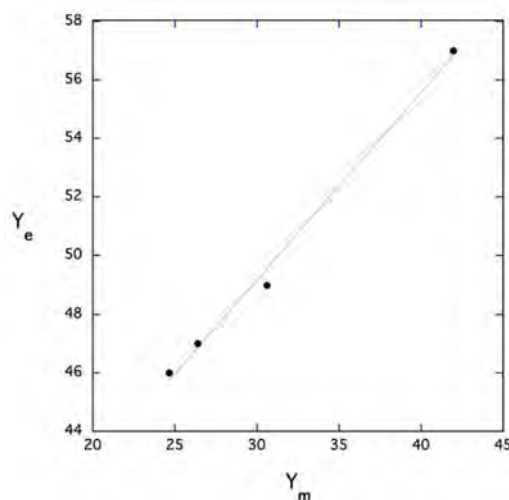


Figura 3. Correlación entre los rendimientos energético y másico para el Biochar del BGA

Para comprobar esto, el biochar obtenido fue caracterizado por diferentes técnicas para elucidar las características importantes en función de la temperatura de pirólisis. Los biochar obtenidos tienen entre bajas área específicas. Las isothermas de adsorción de N_2 y el modelo BET indican áreas específicas de los biochar obtenidos entre 30 y 80 m^2/g , esto dependiendo de la temperatura de operación durante la pirólisis, esto indica además que el desarrollo de la estructura porosa también depende de la temperatura de pirólisis.

En la Figura 4 se muestran fotografías del biochar obtenido, así como las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM de las siglas en inglés) medidas con un objetivo de 500x.

Se observan claramente las diferencias en el grado de carbonización y la formación de una estructura macroporosa que efectivamente presenta un mejor desarrollo a medida de que la temperatura de pirólisis aumenta.

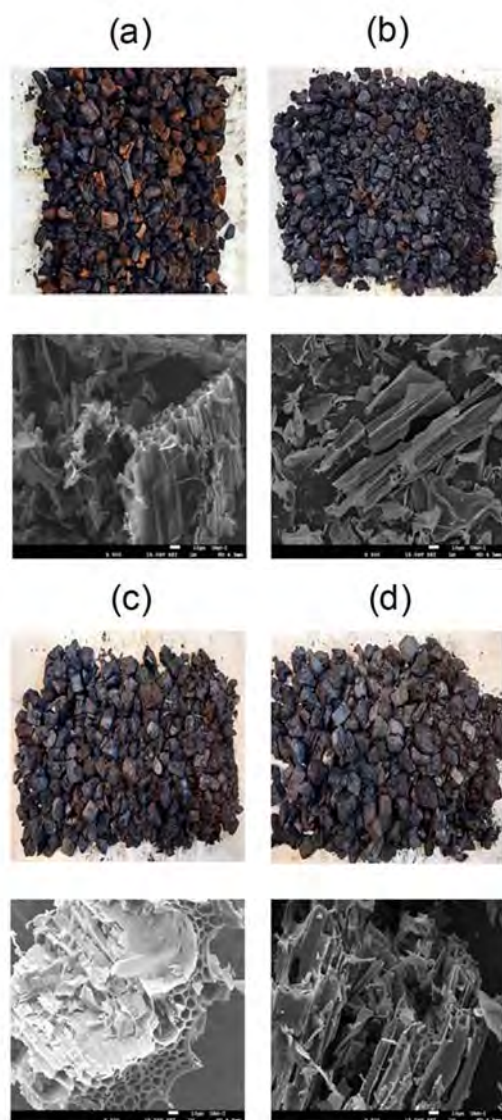


Figura 4. Fotografías e imágenes SEM de Biochar obtenido a 300 °C (a), 400 °C (b), 500 °C (c) y 600 °C (d).

El análisis FTIR (Figura 5) muestra la evolución de grupos funcionales en la estructura del Biochar con la temperatura. Los grupos hidroxilo (-OH), presentes entre 3600-3200 cm^{-1} , disminuyen con la temperatura indicando deshidratación térmica.

Los estiramientos C-H de grupos alquilo, entre 3000-2800 cm^{-1} , reducen su intensidad, reflejando así la degradación de cadenas alifáticas. La banda entre 1750-1650 cm^{-1} característica de grupos carbonilo (C=O) también decrecen progresivamente, sugiriendo la formación de

estructuras aromáticas. La intensificación de la banda entre 1600-1400 cm^{-1} correspondientes a los enlaces C=C confirma mayor estabilidad estructural. Además, las bandas C-O en 1300-1000 cm^{-1} disminuyen, indicando conversión a compuestos más carbonizados [3, 4]. Finalmente, la presencia de señales entre 900-700 cm^{-1} es una evidencia de la formación de una estructura gráfica más ordenada a temperatura elevadas [6].

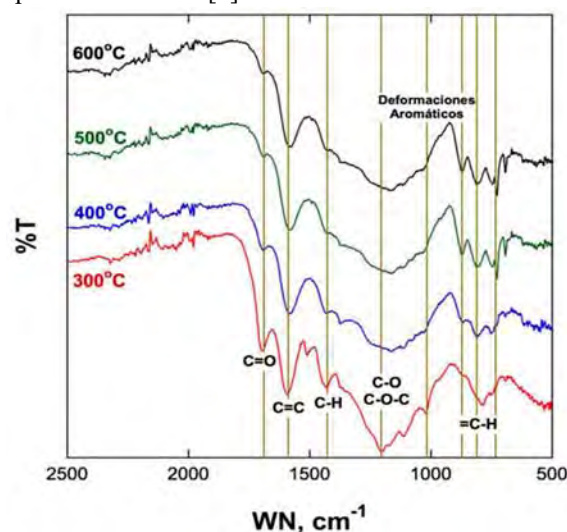


Figura 5. Espectros FTIR de las muestras de biochar obtenidas a entre 300 y 600 °C.

Los espectros Raman del biochar presentan la banda D alrededor de 1350 cm^{-1} , correspondiente a átomos de carbono de defectos o estructuras desordenadas y la banda G en ~1590 cm^{-1} , que indica átomos de carbono en estructuras gráficas. En la literatura es común reportar la relación de intensidades entre las bandas Raman D/G lo cual se relaciona con el ordenamiento del material [6, 8]. Estos resultados concuerdan de cierta forma con lo que muestran los patrones de DRX [6].

En conjunto, los resultados obtenidos no solo facilitan la identificación de fases y defectos en el material, sino que también aportan información clave para optimizar el proceso de pirólisis y garantizar la calidad del biochar producido.

Al integrar mediciones directas con cálculos, es posible realizar una comparación precisa de la distribución y calidad de las fracciones producidas, facilitando entonces un análisis exhaustivo del rendimiento del proceso.

La Tabla 1 muestra los valores de las variables necesarias para generar el diagrama de van Krevelan del biochar [6, 7].

Este diagrama fue establecido por Dirk van Krevelen en 1950 [9] y resulta útil para mostrar la evolución de tres componentes importantes de la biomasa durante el proceso de carbonización [7]. A continuación se presentan varias correlaciones basadas en nuestros resultados y la literatura para obtener las relaciones H/C y O/C y compararlas con los datos obtenidos por análisis químico elemental [6, 7, 8].

RV, corresponde al contenido volátil residual [6, 7, 8]:

$$RV = -23.70 + 1.07735y_m \quad (4)$$

V_{daf} , representa el contenido volátil en base seca libre de cenizas:

$$V_{daf} = \frac{RV}{y_m} \quad (5)$$

H/C, es la relación entre hidrógeno y carbono [6, 7, 8]:

$$\frac{H}{C} = -0.0144 + 0.0177V_{daf} \quad (6)$$

O/C, indica la relación entre oxígeno y carbono [6, 7, 8]:

$$\frac{O}{C} = 0.077 + 0.3253 \frac{H}{C} + 0.0647 \left(\frac{H}{C} \right)^2 \quad (7)$$

La relación O/C_{sem}, que se obtuvo a partir del análisis cuantitativo EDX por SEM. Dichos valores se lograron calcularon con las siguientes correlaciones [6].

Tabla 1. Determinación de parámetros para el diagrama de Van Krevelan del Biochar [6].

T (°C)	D/G	RV	V_{daf}	H/C	O/C	O/C _{SEM}
300	0.33	21.511	51.260	0.892	0.350	0.317
400	0.52	9.278	30.309	0.522	0.195	0.303
500	0.53	4.730	17.925	0.303	0.112	0.118
600	0.6	2.864	11.615	0.191	0.072	0.104

A medida que disminuye el valor de H/C (indicativo de un incremento en la aromatización y condensación de la red carbonosa) también se reduce el valor de O/C, lo que sugiere una eliminación progresiva de grupos funcionales oxigenados durante el proceso. Es importante resaltar la correlación entre

los resultados de EDX-SEM con los obtenidos a partir de las correlaciones utilizadas (Tabla 1). El comportamiento de estos datos se observa claramente en el diagrama van Krevelan (Figura 6) el cual muestra la correlación lineal entre H/C y O/C ($R^2 = 0.998$). Se incluye también la correlación lineal entre el rendimiento energético expresado como fracción, y la relación O/C ($R^2 = 0.989$). Esto indica que el rendimiento energético, depende ligeramente de la eliminación progresiva de grupos funcionales oxigenados.

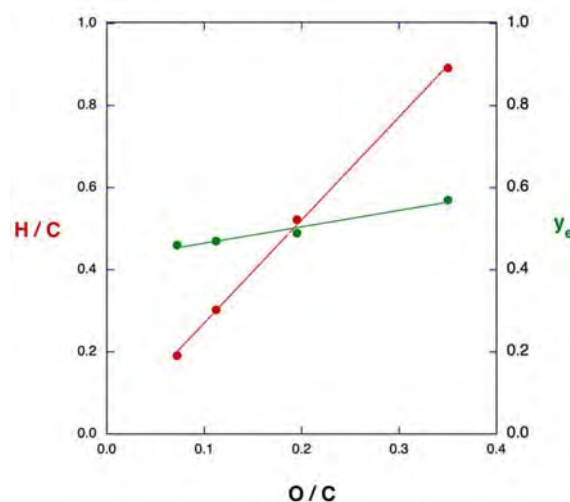


Figura 6. Diagrama de van Krevelan, H/C en función de O/C y rendimiento energético en función de O/C para el biochar del BCA.

6. CONCLUSIONES

Se realizó la pirólisis de bagazo de caña en un reactor de pirólisis de lecho fijo operado en atmósfera de N₂. Los rendimientos másico y energéticos a Biochar disminuyen con la temperatura, sin embargo, la calidad de la estructura del carbón mejora con la temperatura. Entre 21–22% de la masa original del bagazo (base seca) termina convertida en carbono fijo en el biochar, esto es prácticamente independiente de la temperatura una vez removida la mayor parte de volátiles. Esto se refleja en el diagrama van Krevelan. En particular la pirólisis del bagazo de caña de azúcar, permite un rendimiento másico de 26% a un biochar con bajo contenido de oxígeno (O/C = 0.072) y un rendimiento energético de 46%. El biochar obtenido a 600 °C contiene prácticamente la misma cantidad absoluta de carbono fijo que a 400 °C, sólo que concentrada en menos masa. Esto es deseable si el objetivo es un biochar de alta pureza carbonosa (para



adsorbentes o combustibles sólidos de alto poder calorífico). Por otro lado, el biochar obtenido tiene buena calidad superficial y energética, pero baja área específica, por lo tanto, para el desarrollo de una estructura porosa es necesario activarlo para su aplicación como adsorbente o fertilizante, es posible activarlo y producir carbón activado. Las pruebas preliminares nos indican que la activación química permite un carbón activado microporoso de 900 m²/g útil para la adsorción de CO₂ en mezclas binarias.

REFERENCIAS

- [1]. <https://www.zafranet.com/noticias/zafra-2024-25-produccion-de-azucar-acumulada-supera-los-4-6-millones-de-toneladas/>
- [2]. Karp S.G., Woiciechowski A.L., Soccol V.T., Soccol R., *Pretreatment strategies for delignification of sugarcane bagasse: A review*. Brazilian Archives of Biology and Technology 56, 679-689 (2013). 10.1590/S1516-89132013000400019.
- [3]. Parihar M.F., Kamil M., Goyal H.B., Gupta A.K., Bhatnagar A.K., “An experimental study on pyrolysis of biomass”, *Trans I Chem. E., Part B, Process Safety and Environmental Protection*, 85, B5, 458-465 (2007). 10.1205/psep07035.
- [4]. Toscano Miranda N., Lopes Motta I., Maciel Filho R., Wolf Maciel M.R., “Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties” *Renew. Sustain. Energy Rev.* 149, 111394 (2021). 10.1016/j.rser.2021.111394.
- [5]. Rambhatla N., Panicker T., Mishra R.K., Manjeshwar S.K., Sharma A., “Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield its physicochemical properties”, *Results in engineering* 25, 103679 1-12 (2025). 10.1016/j.rineng.2024.103679.
- [6]. Sánchez Castillo O., Vizcarra Mendoza M.G., Martínez Vera C., Gómez Torres S.A., Rojas García E., “Producción de biochar a partir de la pirólisis de bagazo de caña de azúcar”, *Avances en IQ* 4(1), AMB 343-AMB348 (2025). ISSN: 2683-2925.
- [7]. Weber K., Quicker P., “Properties of biochar”, *Fuel* 217, 240-261 (2018). 10.1016/j.fuel.2017.12.054.
- [8]. Xu J., Liu J., Ling P., Zhang X., Xu K., He L., Wang Y., Su S., Hu S., Xiang J., “Raman spectroscopy of biochar from the pyrolysis of three typical Chinese biomasses: A novel method for rapidly evaluating the biochar property”, *Results in Energy* 202, 1-10, 117644 (2020). 10.1016/j.energy.2020.117644.
- [9]. D. van Krevelen, “Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal”, *Fuel* 29, 269-284 (1950).





El futuro del uso de aire acondicionado en vivienda en la Ciudad de México

C. L. HEARD^{1*}, S. M. OLIVERA VILLARROEL¹, E. GARCÍA LÓPEZ¹, L. F. GARCÍA FRANCO¹, A. RODEA CHÁVEZ¹, M. EAMES²

^a Departamento de Teoría y Procesos del Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, Avenida Vasco de Quiroga 4871,

Col. Santa Fe Cuajimalpa.

Alcaldía Cuajimalpa de Morelos, Ciudad de México.

C.P. 05348, MÉXICO

^b Environment and Economy, Department of Engineering, University of Exeter, North Park Road, Exeter, EX4 4QF, REINO UNIDO

Autor de Correspondencia: C. L. Heard (e-mail: cheard@cua.uam.mx)

Palabras Clave: *Cambio Climático, Confort térmico, Aire Acondicionado, Ciudad de México, Vivienda*

RESUMEN: Una práctica común en la Ciudad de México durante la temporada de calor es abrir las ventanas por la noche para reducir la temperatura en las recámaras. Sin embargo, simulaciones de modelado térmico dinámico con datos meteorológicos horarios futuros muestran que esta estrategia perderá eficacia: las oportunidades de enfriamiento natural nocturno disminuirán, mientras que aumentará la frecuencia y duración de condiciones térmicas incómodas. Esta situación propiciará una mayor adquisición y uso de sistemas de aire acondicionado. El uso cotidiano de aire acondicionado en viviendas en la Ciudad de México cambiará los patrones de horarios y la magnitud de consumo pico en zonas residenciales. Para evaluar este escenario, se realizaron simulaciones dinámicas con el software ESP-r, utilizando materiales y tipologías constructivas típicas de la ciudad. El modelo consideró el confort térmico de una persona acostada en la recámara principal de una vivienda de dos niveles y dos habitaciones. Los datos meteorológicos horarios históricos del NCEI (EE. UU.) se procesaron y complementaron con radiación solar estimada mediante el modelo de Zang Huang modificado con información reciente del NSRDB. A partir de esta base se generó un archivo TMY3 (año típico) y se ajustaron proyecciones con un ensamble de modelos climáticos del CMIP6. Los resultados muestran la frecuencia de eventos de malestar térmico y la duración de los periodos incómodos. Dichos indicadores

están estrechamente vinculados con la necesidad de adquirir aire acondicionado y ofrecen una referencia sobre cuándo dejará de ser factible el enfriamiento nocturno natural, información crucial para la planeación futura de la red eléctrica en la Ciudad de México.

PALABRAS CLAVE: Cambio Climático, Confort térmico, Aire Acondicionado, Ciudad de México, Vivienda.

1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México y sus municipios colindantes constituyen la zona urbana más extensa de la República Mexicana, con una población de poco más de 20 millones de personas [1]. Actualmente, la región disfruta de un clima muy agradable durante la mayor parte del año, con temperaturas máximas diurnas de abril a principios de junio que, en ocasiones, superan los 30 °C, aunque la mayor parte del año estas temperaturas rondan los 25 °C [2]. Por lo tanto, actualmente existe poca demanda de aire acondicionado doméstico. Sin embargo, si las temperaturas aumentaran lo suficiente como para que su uso fuera atractivo, la demanda de infraestructura eléctrica se incrementaría drásticamente. Es improbable que toda esta demanda pueda satisfacerse con paneles fotovoltaicos en azoteas y almacenamiento local. Para la planificación a mediano y largo plazo, sería





interesante tener una idea de la eficacia de la apertura de ventanas para lograr confort térmico.

2. CLIMA FUTURO

Dado que la modelización térmica detallada de edificios requiere parámetros meteorológicos horarios locales, como la temperatura, la humedad, la radiación solar y el viento, los resultados de la modelización climática regional no pueden utilizarse directamente. Esta necesidad se ha abordado mediante diversos métodos que dependen, en mayor o menor medida, de los modelos locales y los datos medidos disponibles. Históricamente, la simulación térmica de edificios ha utilizado años representativos de datos horarios derivados de periodos de medición de entre diez y treinta años. Un método ampliamente utilizado es la construcción de un año meteorológico típico (TMY) compuesto por meses seleccionados de datos horarios medidos que se aproximan al comportamiento promedio mensual del periodo general [3].

2.1. Archivo TMY para la Ciudad de México

Se obtuvieron los datos (Para el periodo de 1975 a 2013) de los archivos en formato .csv conforme a “FEDERAL CLIMATE COMPLEX DATA DOCUMENTATION FOR INTEGRATED SURFACE DATA (ISD) January 12, 2018 NOAA” - National Centers for Environmental Information, y se normalizaron sobre la hora regular para formar archivos en formato EPW. Si integró la simulación de radiación solar horaria directa y difusa siguiendo Huang et al. [4].

2.2. Datos meteorológicos futuros

Se buscaron datos horarios estimados de radiación solar sobre superficies horizontales para los últimos tres años. Los datos disponibles para México desde el sitio del National Solar Radiation Database (NSRD) del National Renewable Energy Laboratory (NREL) de EE. UU. Éste actividad se realizó ante la observación que los coeficientes del modelo Zang y Huang (ZHM) [5] utilizado para estimar la radiación solar a partir de temperaturas, humedad y cobertura de nubes (datos comúnmente disponibles en los registros meteorológicos para una cantidad significativo de sitios en México) pudieron ser mejorados para dichos sitios usando los datos de radiación solar en superficie horizontal estimados por el NSRD. El trabajo de Riveros-Rosas, D. [6], et al., donde se muestra que, dada la falta de un programa constante de recalibración periódica de los solarímetros de la red nacional de observación de radiación solar, los datos del modelo del NSRD son de mejor calidad que los medidos en tierra. Los coeficientes de ajuste del modelo para climas Cwb de la nomenclatura de

Koppen publicados para el ZHM fueron determinados con datos de 1993 de la Ciudad de México. Desde aquel entonces, la turbiedad de la atmósfera en la CDMX ha cambiado mucho.

Para ajustar los datos TMY para años futuros, se utilizaron los métodos de Eames et al. [7] basados en un ensamble de los resultados de modelos regionales reportados en el CMIP6. Los modelos utilizados fueron: ACCES-CM2, AWI-CM-1-1MR, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR y UKESM1-0-LL, siendo los únicos que proporcionan todos los parámetros necesarios. Los escenarios considerados fueron: `historical_r1i1p1f1_gn_185001-201412` y `ssp245_r1i1p1f1_gn_201501-210012` para lo histórico y el futuro respectivamente.

3. SIMULACIÓN DE UNA CASA REPRESENTATIVA

En la zona metropolitana del Valle de México, el tipo de vivienda más común es la casa de dos pisos, con casas similares a los lados. Se ha considerado que, en el futuro, estas casas usarán iluminación LED y refrigeradores de consumo estándar, ya que es probable que no se utilicen tecnologías menos eficientes que las actuales.

La simulación mediante el programa ESP-r es apropiada para situaciones donde la temperatura de la edificación se controla de forma natural. Este programa permite controlar de manera aproximada la temperatura interior mediante estrategias como la apertura de ventanas, debido a su sistema de uso de volúmenes finitos y conservación de energía [8].

La simulación considera que las propiedades de los materiales de construcción, como la densidad, conductividad y capacidad térmica, se mantienen constantes a lo largo de la simulación. Esto simplifica el modelo, pero puede introducir cierta incertidumbre si estos parámetros varían significativamente en función de las condiciones. Para modelar el flujo de aire a través de grietas y escapes alrededor de ventanas y puertas, el programa utiliza la ecuación (1). Esta ecuación considera factores como la diferencia de presión a través de la abertura y el coeficiente de descarga. Adicionalmente, las ventanas abiertas se modelan como orificios utilizando la ecuación (2), que relaciona el caudal de aire con la diferencia de presión.

La simulación utiliza datos meteorológicos horarios y realiza cuatro pasos de tiempo por hora tanto para la simulación térmica como para la del flujo de aire. Esto permite capturar con mayor detalle la dinámica de los intercambios de calor y las variaciones de las condiciones exteriores a lo largo del día. En general, el conjunto de programas ESP-r tiene capacidades y limitaciones bien documentadas, las cuales se



pueden encontrar en el manual de uso de J. Hand [9]. Estos antecedentes son importantes para entender el alcance y las restricciones del modelo de simulación utilizado.

$$\dot{m} = \rho k \Delta P^x \quad (\text{kg/s}) \quad (1)$$

donde

$$x = 0.5 + 0.5 \exp(-500W)$$

$$k = L9.7(0.0092)^x/1000$$

W = ancho de la grieta (mm)

L = largo de la grieta (m)

$$\dot{m} = C_d A^2 \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (\text{kg/s}) \quad (2)$$

donde

C_d = factor de descarga = 0.65

A = área abierta (m²)

2.1. Archivo TMY para la Ciudad de México

A la hora de determinar los niveles de vestimenta y actividad de los ocupantes de los dormitorios, nos basamos en los trabajos de Lai et al y Lin y Deng [10],[11]. Lin y Deng desarrollaron un modelo de confort térmico específico para recámaras en climas subtropicales, incluyendo medidas de aislamiento para ropa de cama y pijamas (Ecuación 3). Por lo que, para evaluar el confort térmico de la vivienda, se utilizó el "Voto Medio Estimado" (PMV por sus siglas en inglés), definido por Fanger (ASHRAE, 2021). El PMV es una escala que mide la satisfacción de un grupo de personas con las condiciones térmicas que experimentan, en una escala que va de -3 (frío) a +3 (caliente), pasando por neutro (0).

De acuerdo con la norma ASHRAE de 2021, esta medida permite comparar la tasa metabólica de organismos de diferente tamaño y temperatura. En el caso del estudio, la tasa metabólica se define en términos de producción de calor por unidad de área de la piel, donde 1 m² equivale a 58 W/m² (ASHRAE, 2021). Con estos parámetros, pudimos modelar de manera más precisa el confort térmico de la vivienda y las necesidades de sus ocupantes, ecuación (3).

$$PMV = 0.0998 \left\{ 40 - \frac{1}{R_t} \left[\left(34.6 - \frac{4.7\bar{t}_r + h_c t_a}{4.7 + h_c} \right) + 0.3762(5.52 - p_a) \right] \right\} - 0.0998[0.056(34 - t_a) + 0.692(5.87 - p_a)] \quad (3)$$

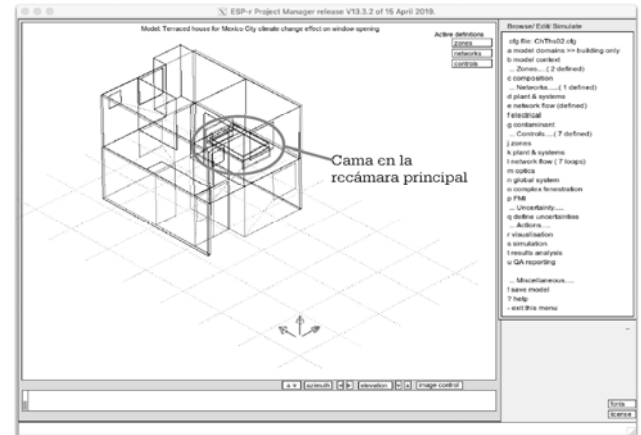


Figura 1. Casa representativa con cama y sensor de ambiente de temperatura de radiación encima de la almohada en la recámara principal.

En el caso de los residentes que duermen en los pisos superiores de una vivienda representativa, se ha considerado que llevan un pijama ligero con una sábana de algodón ligera doblada para exponer el 52% del cuerpo (1,8 clo), mientras se asume un nivel de actividad de 0,7 met.

Para el dormitorio principal, se ha colocado un sensor de temperatura de radiación ambiente ligeramente por encima de la superficie de la almohada, con el fin de registrar las condiciones térmicas del espacio de descanso (Figura 1). Por otro lado, se supone que el espacio de la planta baja de la vivienda se ocupa durante un breve periodo de tiempo por la mañana en los días laborables, y durante todo el día los fines de semana y festivos.

Esta distribución del uso del espacio es relevante para comprender las dinámicas de confort térmico y el potencial de ahorro energético en la vivienda. Durante la noche, cuando las personas pasan la mayor parte de su tiempo en el hogar, se vuelve fundamental garantizar condiciones de confort adecuadas. Es en este momento del día cuando las necesidades de climatización se hacen más evidentes y relevantes para el bienestar de los ocupantes.

4. RESULTADOS

La Figura 2 presenta los valores del Voto Medio Estimado (PMV) en la recámara principal bajo la estrategia pasiva de apertura de ventanas durante la noche. En términos generales, los resultados muestran que es posible alcanzar temperaturas templadas que permiten mantener condiciones aceptables de confort térmico en un número significativo de casos. No obstante, cuando se presentan episodios de incomodidad por calor, las posibilidades de ajuste a través del arropamiento resultan muy limitadas, ya que reducir el nivel de aislamiento por debajo de 1.8 clo —valor correspondiente a pijama ligero y sábana de algodón— es prácticamente inviable para los ocupantes.

Este hallazgo sugiere que, bajo escenarios de mayor estrés térmico, los habitantes tenderán a recurrir con mayor frecuencia a estrategias activas de climatización, como ventiladores o sistemas de aire acondicionado, para compensar la pérdida de eficacia del enfriamiento natural nocturno. La probabilidad de adopción de estas tecnologías aumenta si las condiciones de incomodidad por calor se prolongan por varios días consecutivos, pues la incomodidad acumulada incide de manera significativa en la percepción de bienestar y en la disposición de los hogares a invertir en soluciones mecánicas de enfriamiento.

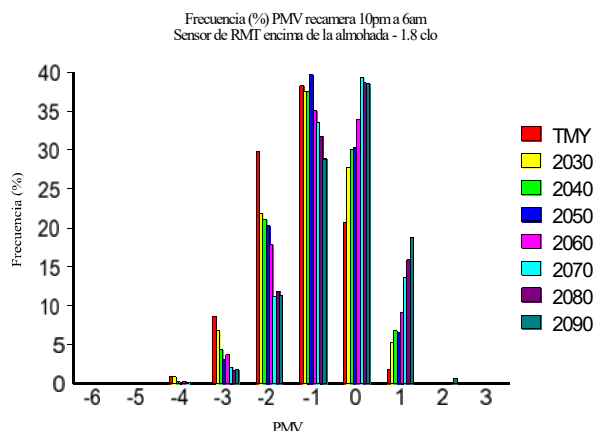


Figura 2. PMV frecuencia entre 22:00 y 06:00 para una recámara de feb. 15 a jun. 15 y 1,8 clo de arropamiento. Sensor de temperatura medio radiante sobre la almohada de la cama.

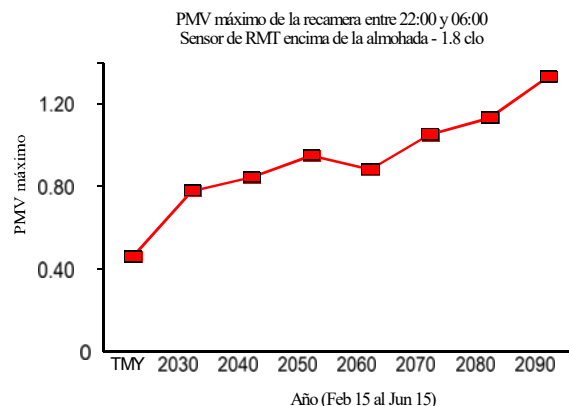


Figura 3. PMV máximo entre 22:00 y 06:00 para una recámara de feb. 15 a jun. 15 y 1,8 clo de arropamiento. Sensor de temperatura medio radiante sobre la almohada de la cama.

5. CONCLUSIONES

5.1. Tendencias

Los resultados muestran una clara tendencia a incrementos en el PMV. En las situaciones de incomodidad por frío es de esperar que se resuelva mediante el uso de mayor arropamiento. Sin embargo, al nivel de 1.8 clo es difícil lograr confort en condiciones de exceso de calor por medio de cambiar de ropa. El ejemplo modelado muestra las tendencias, sino la magnitud que en casos particulares puede ser niveles de PMV mucho más altos.

5.2. Impacto

En muchos casos, los PMV serán más altos y propiciarán la compra y uso de aire acondicionado con una demanda eléctrica mucho mayor que lo usual en vivienda en el Valle de México. La consecuencia de las inversiones necesarias en capacidad de transmisión y distribución de energía eléctrica en el Valle de México puede ser significativa.

5.3. Mitigación

En otras ciudades de la República con climas más extremos, los resultados de aislamiento térmico de techos han sido muy exitosos y sumamente rentables (Desde el punto de vista del ocupante y también de subsidios al consumo eléctrico evitados).



El uso de generación eléctrica distribuida en forma local (Paneles PV con baterías) será cada vez más barato y rentable para usuarios domésticos con alto consumo.

AGRADECIMIENTOS

UAM Cuajimalpa, proyectos: "El diseño ante el cambio climático: Divulgación, normatividad e información climatológico" y "Sostenibilidad y circularidad - Retos y oportunidades para el sector forestal ante el cambio climático (FORSCIRC)"

CONAcYT-SENER: Proyecto 246157 "Cambio climático y su impacto sobre el diseño de vivienda y edificios y las necesidades de modificación de las NOM-020-ENER-2011 y NOM-008-ENER-2001"

REFERENCIAS

- [1]. Disponible:
<http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx> [Accedido 18/06/2019].
- [2]. Disponible:
<https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=df> [Accedido 18/06/2019]
- [3]. Weather Files for Current and Future Climate, Available at:
http://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/research/newsandevents/newsandeventsarchive/Weather_Files.pdf [Accedido 2/06/2016]
- [4]. Joe, Yü, Huang Fenxian, and Donghyun Seo. "Development of 3012 IWEC2 weather files for international locations (RP-1477)." *Ashrae Transactions* 120.1 (2014).
- [5]. Zhang, Q.Y., Y.J. Huang, and S.W. Lang. 2002. Development of Typical Year Weather Data for Chinese Locations, LBNL-51436. ASHRAE Transactions, June 2002, Honolulu HI.
- [6]. Riveros-Rosas, D., et al. "Analysis of a solarimetric database for Mexico and comparison with the CSR model." *Renewable Energy* 75 (2015): 21-29.
- [7]. Eames, Matthew E., et al. "A revised morphing algorithm for creating future weather for building performance evaluation." *Building Services Engineering Research & Technology* 45.1 (2024): 5-20.
- [8]. ESP-r Overview. (2022). Strath.Ac.Uk. Accedido enero, 2019,
http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.htm
- [9]. Estrategias para el desarrollo de representaciones virtuales del ambiente construido (También conocido como el recetario de ESP-r). Jon William Hand B.Sc., M Arch., PhD, FIBPSA (2024) <http://dccc.cua.uam.mx/repositorio/libros.php?libro=ManualdeESPr>. Accedido el 26 ago. 2025.
- [10]. Lai, D., Jia, S., Qi, Y., & Liu, J. (2018). Window-opening behavior in Chinese residential buildings across different climate zones. *Building and Environment*, 142, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.030>
- [11]. Lin, Z., & Deng, S. (2008). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics-developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*, 43(1), 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.026>.





Efecto que tiene la presencia de H_2 en la reducción de NO con un catalizador estructurado de Pt-Ag

NAOMI NALLELY GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ¹, JOSÉ LUIS CONTRERAS LARIOS¹, BEATRIZ ZEIFERT², GUSTAVO A. FUENTES ZURITA³, RICARDO LÓPEZ MEDINA¹ Y MARÍA EUGENIA HERNÁNDEZ TERAN¹

¹ Procesos de la Industria Química II, Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Pablo No. 420, Azcapotzalco, 02128, México, México

² ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, Av. Instituto Politécnico Nacional, Lindavista, Gustavo A. Madero, 07700. México, México

³ Depto. de I.P.H., Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ra Sección Iztapalapa, 09340. México, México

Autor de Correspondencia: Naomi Nallely González Hernández (e-mail: naomigh25@gmail.com).

RESUMEN Se estudiaron catalizadores estructurados de Pt-Ag soportados en Al_2O_3 -WOx/Cordierita. Estos catalizadores se emplearon para la eliminación de NO que es generado en motores diésel, se usó C_3H_8 e H_2 como reductor en la reacción de RCS de NO. El recubrimiento de los catalizadores basados Al_2O_3 -WOx a partir de boehmita sobre monolitos de cordierita se realizó mediante el método de impregnación (Dipcoating). Los catalizadores fueron caracterizados mediante Fisisorción de N_2 , Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/EDX), Microscopía Electrónica de Transmisión (STEM/HAADF), Difracción de rayos X (DRX) y reducción de temperatura programada (TPR- H_2). La adición de H_2 (1%vol.) fue estudiada en la reducción de NO comparando la actividad catalítica con respecto a usar solo C_3H_8 , se evaluaron tres espacios velocidad de 30 000, 70 000 y 100 000 h^{-1} . La combinación de Pt-Ag soportada en Al_2O_3 -WOx/Cordierita resultó activa en la reducción de NO, en la combustión de CO y C_3H_8 . Mediante STEM, se observó que partículas pequeñas de Pt-Ag (20 nm) presentaban una alta concentración de Pt (58,6% atómico). También se encontraron partículas de Ag separadas. Las condiciones óptimas en la obtención del catalizador estructurado resultó al realizar de 3 a 4 impregnaciones con una suspensión de $AlO(OH)$, posteriormente la impregnación de Pt-Ag, mediante impregnaciones sucesivas comenzando con H_2PtCl_3 y $AgNO_3$, y calcinación en atmosfera de aire a 500°C.

PALABRAS CLAVE: Dipcoating, catalizador estructurado, Pt-Ag/ Al_2O_3 -WOx, RCS-NO, H

1. INTRODUCCION

La reducción catalítica selectiva de NOx por hidrocarburos (HC-RCS-NOx) en condiciones de exceso de oxígeno ha sido estudiado ampliamente, debido a su potencial para limpiar los gases de escape de motores diésel [1].

Sin embargo, el desarrollo de sistemas eficientes para la reducción de contaminantes atmosféricos, especialmente las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx: NO más NO_2), todavía representa un reto importante, ya que, es uno de los mayores desafíos para la protección del medio ambiente [2].

Hong H. *et al.*, [3], estudiaron la reducción de NO con C_3H_6 empleando catalizadores soportados de Pt, Rh y Ag en Al_2O_3 , ellos encontraron que los catalizadores de Ag fueron más activos a temperaturas más altas (>300 °C), mientras que los que eran a base de Pt y Rh mostraron actividad a temperaturas más bajas (200-250 °C).

Algo que resulta de gran interés al usar la reacción de HC-RCS empleando catalizadores de Ag/ Al_2O_3 , son las altas temperaturas requeridas en la reducción de NO. Sin embargo, ha sido demostrado que la actividad puede mejorar a bajas temperaturas cuando está presente una corriente de H_2 [4].

Hasta ahora se ha discutido la importancia de la tecnología y el catalizador a emplear, ya que, de acuerdo a estudios



previos se ha demostrado que Pt-Ag/Al₂O₃-WO_x es activo en la reducción de NO [5], sin embargo, en el presente trabajo también estudia la obtención de un catalizador estructurado (catalizador monolítico).

Se sabe que uno de los sistemas catalíticos más utilizados en aplicaciones ambientales es el reactor monolítico. Ya que, estos ofrecen grandes ventajas sobre los catalizadores en pellets o polvo, siendo la más importante la baja caída de presión asociada a los altos caudales comunes en aplicaciones ambientales [6].

La presente revisión se centra en la técnica de preparación de un catalizador estructurado a partir del recubrimiento de monolitos cerámicos de cordierita con baja área superficial. Y su posterior aplicación en la RCS-NO al ser coalimentados 1 %vol. H₂ junto con C₃H₈ durante la evaluación catalítica.

2. METODOLOGIA

2.1. Síntesis del catalizador monolítico

En la obtención del catalizador estructurado se utilizaron monolitos de cordierita comerciales (2MgO₂·2Al₂O₃·5SiO₂) con 400 células por pulgada cuadrada (cps). Los monolitos tienen forma cilíndrica y sus dimensiones son: 5cm de largo x 2.54cm de diámetro.

Se preparó mediante precipitación una suspensión de boehmita (AlO(OH)), se empleó Al(NO₃)₃·9H₂O (99%, Fermont, México) como precursor de la alúmina y (NH₄)₁₂W₁₂O₄₀·5H₂O (66.55%W, Aldrich) para obtener un contenido nominal de 0.5wt%W. Se utilizó NH₄OH al 30% (J.T Baker, USA) como agente precipitante para obtener una suspensión con un pH de 10. También se agregó SiO₂ al 3% en peso (LUDOX, suspensión al 40% en peso, Aldrich) para proporcionar estabilidad mecánica al material final. La suspensión de AlO(OH) promovida con (NH₄)₁₂W₁₂O₄₀·5H₂O, se mantuvo en agitación constante durante 12 h a 25°C.

Después de este tiempo de envejecimiento la suspensión se usó para la impregnación de los monolitos mediante el método de inmersión total (Dipcoating). Previamente los monolitos recibieron tratamiento térmico para estabilizar la fase y eliminar humedad e impurezas del ambiente. Este consistió en pasar una corriente de aire (100 ml/min) durante 3 h a 500 °C.

La impregnación de boehmita se llevó a cabo mediante tres etapas: primero, el monolito se sumergió lentamente en la suspensión, dando tiempo para desplazar el aire de los canales (Figura 1a).

Después, el monolito permaneció sumergido (de 1 a 1.5 h) en la suspensión de boehmita hasta que el aire fue desplazado totalmente (Figura 1b).

Y finalmente, el monolito fue extraído a velocidad constante y colocado en posición vertical para eliminar el exceso de suspensión sobre los canales por efecto de la gravedad (Figura 1c).

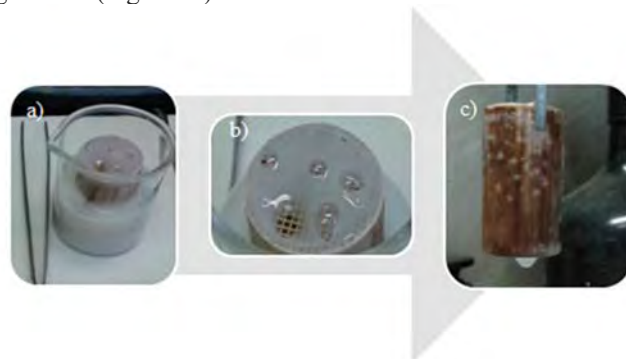


FIGURA 1. Recubrimiento de los monolitos de cordierita por el método Dip-coating. (a) Inmersión; (b) Desplazamiento de aire; (c) Eliminación del exceso de suspensión.

El soporte con la boehmita se secó a 110°C durante 24 h y posteriormente se pesó para determinar la cantidad de boehmita que se depositó en los canales del monolito. Se requirieron cuatro impregnaciones denominados I1, I2, I3 y I4 para depositar 1 g de Al₂O₃-WO_x/Cordierita. La calcinación se realizó a 500°C durante 6 h con atmósfera de 100 ml/ min.

Los metales Pt y Ag se depositaron a partir de soluciones de H₂PtCl₆ (0.1% peso Pt) y AgNO₃ (2% peso Ag) por el método de impregnación por humedad incipiente. La etapa de activación del catalizador se realizó mediante reducción con flujo de H₂ a 500°C por 3h.

Con este procedimiento se estudió el efecto que tiene el número de inmersiones, la frecuencia de inmersión con respecto al espesor y la estabilidad del revestimiento.

2.2. Actividad catalítica

La actividad de los catalizadores se realizó en un reactor escala banco, que se encontraba en posición horizontal dentro de un horno. Para alcanzar las temperaturas de evaluación se usó un control de temperatura con termopares tipo J acoplados en los termopozos del reactor.

La composición de la mezcla contenía 600 ppm de CO, 10%vol. CO₂, 6%vol. O₂, 1750 ppm C₃H₈, 750 ppm NO y N₂. Para lograr una mezcla completa, se alimentó 12% peso de H₂O, el cual pasó por un saturador para transformarlo en vapor. El flujo de gases de emisión arrastró al vapor de H₂O. Variamos el espacio velocidad (GHSV) de 30000, 70000 y

100000 h⁻¹ y llevamos a cabo un barrido de temperatura de reacción de 50 a 500°C.

Para agregar 1% vol. de H₂ se evaluó el catalizador 10%Ni-4.5%Co/Hidrtotalcita-WOx en un microreactor tubular de lecho fijo (reacción simultanea). Se usaron 0.3g de catalizador y el flujo de gas de arrastre fue de 30ml/min, la temperatura de reacción se mantuvo en 450°C. a 450°C por 6 h.

El análisis de los reactivos y productos de reacción fue determinado con un Analizador de Emisiones Automotriz (Marca CONSINO, Modelo FGA-4100(5G)). Para verificar y cuantificar la producción de H₂ se usó un cromatógrafo de gases GOW-MAC, 580 con detector de conductividad térmica (TCD), se usó una columna empacada de Gel de sílice de 1/8"x3m.

3. RESULTADOS

La capa de γ -Al₂O₃-WOx impregnado sobre el monolito de cordierita, así como el catalizador Ag-Pt/Al₂O₃-WOx/Cordierita (Figura 2a) presentaron isothermas tipo IV, de acuerdo a la IUPAC, nos indican la presencia de adsorción física en multicapas, la cual es característica de los sólidos mesoporosos [7].

Los materiales presentan una distribución de tamaños de poro unimodal cuyo máximo se encuentra entre 25 y 44 Å (Figura 2b).

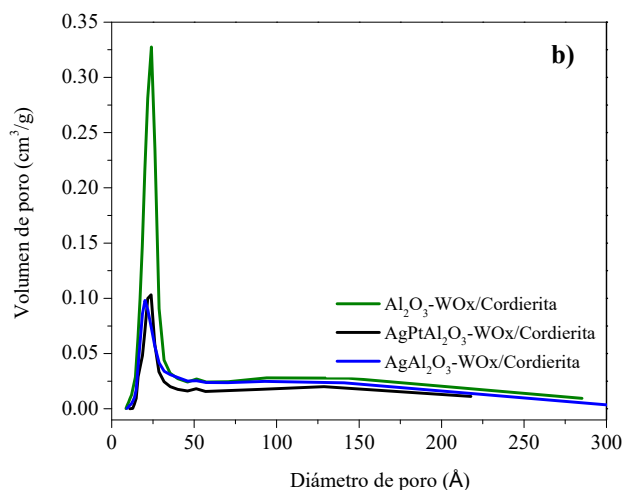
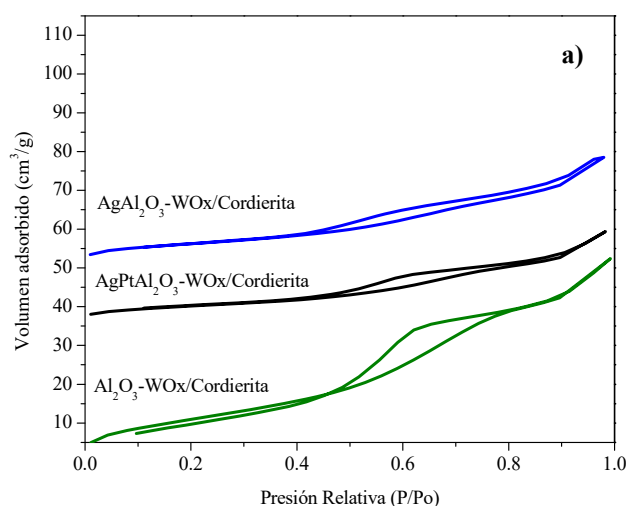


FIGURA 2. Isothermas de adsorción/desorción de N₂ (a) y distribución del tamaño de poro (b) de Al₂O₃-WOx, AgPtAl₂O₃-WOx y AgPtAl₂O₃-WOx sobre Cordierita

El patrón de difracción del catalizador Ag-Pt/Al₂O₃-WOx/Cordierita (Figura 3) muestra picos intensos y agudos característicos de la cordierita cristalina [8].

Por el contrario, no se encontraron señales características de Pt en el patrón de difracción, debido a la resolución limitada del equipo con respecto a la baja concentración. Sin embargo, se observa la presencia de Ag₂O en $2\theta = 38.7^\circ, 50.5^\circ$ y 66.8° , a pesar que estos picos poseen una estructura meta estable, se puede decir, que el compuesto metálico Ag₂O se encuentra presente en la superficie de estos materiales [9].

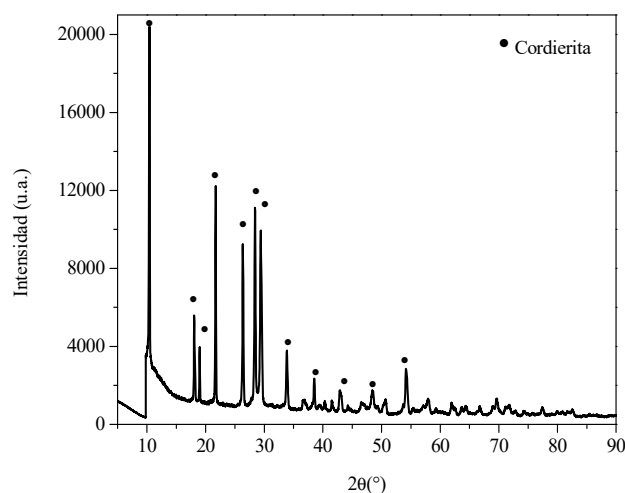


FIGURA 3. Patrón de difracción de rayos-X del catalizador monolítico AgPtAl₂O₃-WOx/Cordierita

En algunas partes del campo de observación de la superficie del catalizador Ag-Pt/Al₂O₃-WO_x/Cordierita (20,000X) se observaron conjuntos o racimos de partículas esféricas deformadas de 0.15 y 0.22 μm (Figura 4).

De acuerdo a estudios previamente reportados [9-10], la presencia de H₂ genera un efecto sobre el catalizador de Ag/Al₂O₃ durante la SCR-NO, encontrándose la Ag predominantemente en forma de racimos (o clúster) de Ag₂O.

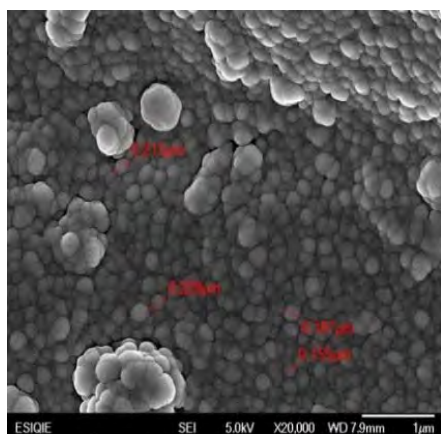


FIGURA 4. Imagen obtenida por SEM del catalizador AgPt/Al₂O₃-WO_x/Cordierita

En el catalizador Ag-Pt/Al₂O₃-WO_x/Cordierita identificado como CAT.1-30 en la posterior etapa de actividad catalítica (Figura 5), se observaron nano partículas de Ag (metal con alta densidad) que contrastan con el soporte de Al₂O₃, teniendo formas redondas sin ser esferas perfectas.

Se obtuvo un tamaño de partícula promedio de 24.04 nm en forma monomodal con tamaños que van de 10 a 60 nm.

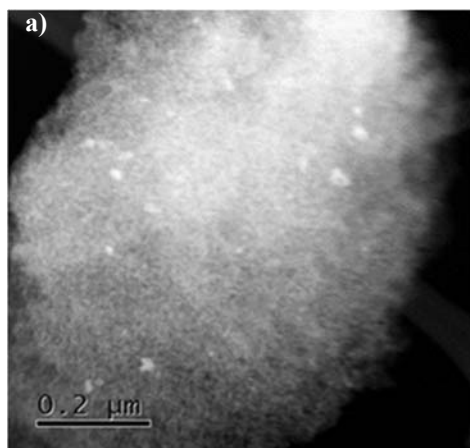


FIGURA 5. Imagen obtenida por STEM del catalizador AgPt/Al₂O₃-WO_x/Cordierita (CAT.1-30) con escala de 0.2 μm

La Figura 6 muestra el perfil TPR-H₂ de los catalizadores 1%pesoPt-2%pesoAg/Al₂O₃-WO_x (Figura 6a) y 0.1%pesoPt-2%pesoAg/Al₂O₃-WO_x (Figura 6b) en polvo.

Ambos catalizadores presentan un pico de reducción cerca de 73 °C, sin embargo, el pico en el catalizador 1%pesoPt-2%pesoAg/Al₂O₃-WO_x (Figura 6a) es más pequeño, este es atribuido a la reducción de Ag₂O a Ag [10].

En el catalizador 0.1%pesoPt-2%pesoAg/Al₂O₃-WO_x (Figura 6a) se observaron dos picos. El primer pico, ubicado a 215 °C, se relacionó con la reducción de las especies de óxido de Pt soportadas, como [Pt(OH)xCl_y]_s [11]. El segundo pico, ubicado a 425 °C, representa la reducción de las partículas superficiales de PtO_x, lo cual concuerda con un informe previo de Kim et al. [12].

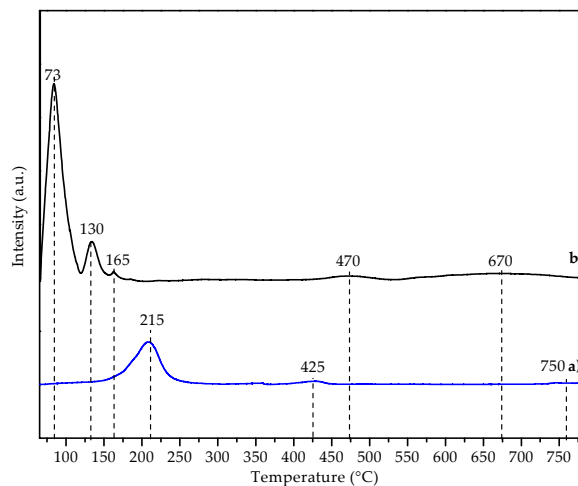


FIGURA 6. Perfiles TPR-H₂ de catalizadores calcinados. 0.1%pesoPt-2%pesoAg/Al₂O₃-WO_x (a) y 1%pesoPt-2%pesoAg/Al₂O₃-WO_x (b)

Las pruebas para la evaluación catalítica en la reacción de reducción de NO utilizando C₃H₈ como gas reductor se llevaron a cabo haciendo un barrido de temperatura desde 50 hasta 500°C.

Cada evaluación corresponde a un espacio velocidad distinto (GHSV= 30,000, 70,000 y 100,000 h⁻¹). Previo a la evaluación catalítica, los catalizadores se redujeron ex-situ con flujo de H₂ a 500°C durante 3 h.

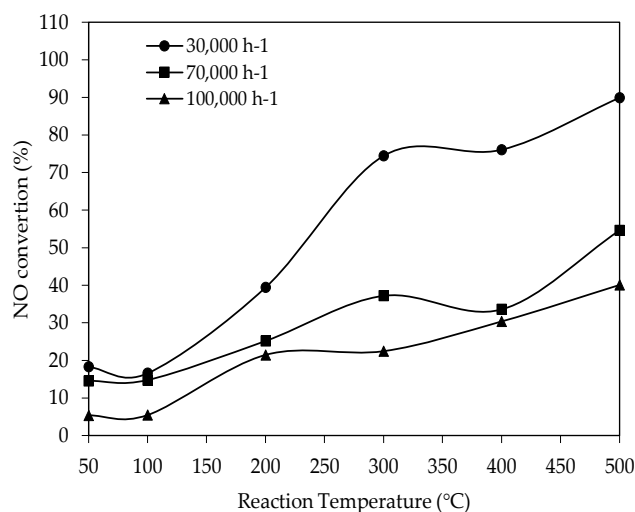


FIGURA 7. Conversión de NO variando el GHSV con el catalizador AgPt/Al₂O₃-WOx/Cordierita en la reacción SCR con C₃H₈.

La conversión de NO (Figura 7) aumenta por encima de los 300°C en los tres catalizadores, sin embargo, a medida que el espacio velocidad (GHSV) es mayor la conversión se ve reducida.

Las bajas conversiones obtenidas en los catalizadores evaluados a 70000 y 100000 h⁻¹ está directamente relacionado con el tiempo de residencia de la corriente de gas de arrastre (mezcla sintética de gases de emisión diésel) y con las condiciones de reacción como el barrido de temperatura y la masa del catalizador.

El rendimiento del catalizador Ag-Pt/Al₂O₃-WOx/Cordierita (CAT.1-30) mostrado en la Figura 8, se evaluó en presencia de 1%vol. H₂ que se introdujo en la corriente de gas de entrada (mezcla sintética de gases de emisión diésel) a 30,000 h⁻¹. Se observaron dos máximos de conversión de NO, uno a 150°C con un 93% y el otro entre 280-320°C con una conversión del 95%.

Cuando el GHSV se incrementó a 70,000 h⁻¹ (0.1%Pt-2%Ag/Al₂O₃-WOx/Cordierita (CAT.2-70)) todavía se observaron los dos máximos de conversión de NO. El primero fue a 100°C y el segundo a 350°C. La mayor conversión de NO se observó del 98% a 100°C y una conversión del 99% en el segundo máximo a 350°C.

A un GHSV de 100,000 h⁻¹ (0.1%Pt-2%Ag/Al₂O₃-WOx/Cordierita (CAT.3-100)) se observaron los dos máximos de conversión de NO informados anteriormente. El primero fue a 105°C con un 86% y el segundo a 400°C con un 95%. Como hemos visto en este rango, el agente reductor es

principalmente el C₃H₈, incluso en catalizadores de Ag/Al₂O₃ y donde el producto principal es el N₂ [13].

En estas reacciones en presencia de pequeñas cantidades de H₂ sugieren que este reductor realiza dos funciones. Primero, el H₂ podría eliminar los nitratos adsorbidos con la formación simultánea de más sitios de Ag y, en segundo lugar, la velocidad de reacción de reducción en los sitios de Ag ha sido más rápida, debido a una energía de activación (E_a) más baja que la energía de activación cuando no hay H₂ [14].

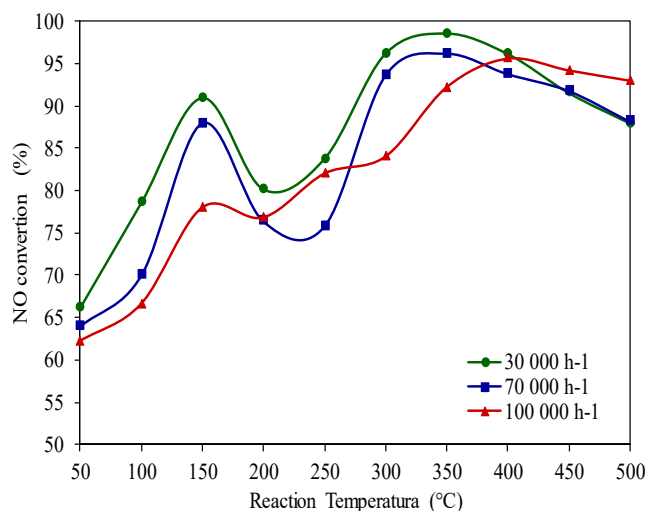


FIGURA 8. Conversión de NO con el catalizador AgPt/Al₂O₃-WOx/Cordierita variando el GHSV en la reacción SCR con C₃H₈ y H₂.

4. CONCLUSIONES

El proceso de recubrimiento mediante el método de Dip-coating mostró un aumento de peso del soporte en los monolitos de cordierita luego de realizar las impregnaciones para saturar la superficie interna del monolito. El espesor del recubrimiento de Al₂O₃-WOx resultó de 45 µm.

Las mejores condiciones de preparación fueron de 3 a 4 impregnaciones sucesivas con la suspensión de boehmita (AlO(OH)) y la calcinación en flujo de aire a 500°C.

Con este procedimiento se pudo ver el efecto que tiene el número de impregnaciones, la frecuencia de impregnación con respecto al espesor de la película y la estabilidad del revestimiento al adicionar 3% peso de SiO₂.

Mediante los resultados obtenidos TEM se encontró que al disminuir el diámetro de la partícula a 20 nm, la concentración de Pt aumenta a 58,6 at.%, mientras que, si el diámetro aumenta a 30 nm, la concentración de Pt disminuye a 11 at.%. El perfil de conversión de NO versus la temperatura de reacción del catalizador de 0.1%Pt-2%Ag soportado sobre



Al_2O_3 -WO_x/Cordierita fue muy similar al perfil del mismo catalizador en polvo.

Asimismo, las mayores conversiones de NO correspondieron a catalizadores con altas dispersiones de Pt y con 5.95% en peso de Al_2O_3 -WO_x depositado sobre los monolitos. La conversión de NO, muestra dos temperaturas donde la conversión es alta, en el primer rango de temperatura (a 150°C) se encontró un máximo de 94% (a 150°C) mientras que entre 300 y 400° C hay un intervalo donde la conversión se mantiene en 98%.

Se pudo observar el efecto que tiene la presencia de H₂ como un segundo gas reductor, ya que, la conversión de NO a temperaturas por debajo de los 200°C es muy baja cuando solamente tenemos C₃H₈, pero al adicionar el H₂ la ventana de temperatura de operación se amplía y las conversiones están por encima de 80% aún con la variación del GHSV.

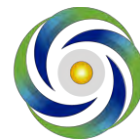
AGRADECIMIENTOS

La autora Naomi González Hernández agradece el apoyo del Laboratorio de Procesos de la Industria Química a cargo del Dr. José Luis Contreras Larios.

REFERENCIAS

- [1]. Arve, K., Svennerberg, K., Klingstedt, F., Era I n e n, K., Wallenberg, L. R., Bovin, J. O., Capek, L. and Murzin D. Y. *Structure-Activity Relationship in HC-SCR of NO_x by TEM, O₂-Chemisorption, and EDXS Study of Ag/Al₂O₃*. J. Phys. Chem. B. 2006, 110, 420-427. 10.1021/jp055147x
- [2]. Guangyan, X., Jinzhu, M., Guangzhi, H., Yunbo, Y., Hong H. (2017). *An alumina-supported silver catalyst with high water tolerance for H₂ assisted C₃H₈-SCR of NO_x*. Applied Catalysis B: Environmental, 207, 60–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.001>
- [3]. Hong, H., Jin, W., Qingcai F., Yunbo Y., Kiyohide Y. (2003). *Novel Pd promoted Ag/Al₂O₃ catalyst for the selective reduction of NO_x*. Applied Catalysis B: Environmental, 46, 2, 365–370. doi.org/10.1016/S0926-3373 (03)00242-X.
- [4]. Sawatmongkhon, B., Tsolakis, A., Theinnoi, K., York, A. P. E., Millington, P. J., Rajaram, R. R. (2012). *Microkinetic modelling for selective catalytic reduction (SCR) of NO_x by propane in a silver-based automotive catalytic converter*. Applied Catalysis B: Environmental, 111-112, 165-177. doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.09.031.
- [5]. González Hernández, N.N.; Contreras, J.L.; Pinto, M.; Zeifert, B.; Flores Moreno, J.L.; Fuentes, G.A.; Hernández-Terán, M.E.; Vázquez, T.; Salmones, J.; Jurado, J.M. *Improved NO_x Reduction Using C₃H₈ and H₂ with Ag/Al₂O₃ Catalysts Promoted with Pt and WO_x*. Catalysts 2020, 10, 1212. doi.org/10.3390/catal10101212.
- [6]. Avila, P., Montes, M., Miró, E. E. *Monolithic reactors for environmental applications A review on preparation technologies*. Chemical Engineering Journal 109 (2005) 11–36. doi:10.1016/j.cej.2005.02.025
- [7]. Neimark, A., V., Sing, K., S., W. y Thommes, M. *Handbook of heterogeneous catalysis*. Edition (2008). Ertl. G., Knozinger, H. Schuth, f. y Weitkamp, J.
- [8]. X. Xiaohong, Z. Yinfeng, W. Jianfeng, H. Cheng, T. Zhaohui. *Preparation and performance study of cordierite/mullite composite ceramics for solar thermal energy storage*. International Journal of Applied Ceramic Technology, 14, 2, (2017) 162–172.
- [9]. M. Richter, U. Bentrup, R. Eckelt, M. Schneider, M.M. Pohl, R. Fricke. *The effect of hydrogen on the selective catalytic reduction of NO in excess oxygen over Ag/Al₂O₃*. Applied Catalysis B: Environmental, 51(4) (2004), 261-274.
- [10]. Hernández-Terán Maria E., Fuentes Gustavo A., *Enhancement by H₂ of C₃H₈-SCR of NO_x using Ag/γ-Al₂O₃*. Fuel, 138, (2014) 91–97.
- [11]. Lieske, H.; Lietz, G.; Spindler, H.; Volter, J. *Reactions of Platinum in Oxygen- and Hydrogen-Treated Pt/Al₂O₃*. Catalysts. Temperature-Programmed Reduction, Adsorption, and Redispersion of Platinum. J. Catal. 81, (1983) 8–16. Doi.org/10.1016/0021-9517 (83)90142-2.
- [12]. Sung Su Kim, Hyun Hee Lee, Sung Chang Hong. *A study on the effect of support's reducibility on the reverse water-gas shift reaction over Pt catalysts*. Applied Catalysis A: General. (2012), 423– 424, 100–107. Doi.org/10.1016/j.apcata.2012.02.021.
- [13]. S. Linda, C. Per-Anders, S. Magnus, H. Hanna. *Surface Species and Metal Oxidation State during H₂-Assisted NH₃-SCR of NO_x over Alumina-Supported Silver and Indium*. Catalysts, 8, 1, (2018) 38.
- [14]. S. Pratichi, Y. Deepak, T. Pooja, P. Jitendra, P. Ram. *Studies on H₂-Assisted Liquefied Petroleum Gas Reduction of NO over Ag/Al₂O₃ Catalyst*. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 13, 2, (2018) 227-235.





Degradación fotocatalítica de fenol utilizando catalizadores de Ni/MCM-41

YULISSA ALELI ESQUIVEL CORONA^a, LAURA ANNETTE ROMERO DE LEÓN^b, JESÚS ALEJANDRO LÓPEZ GAONA^c, SANDRA CIPAGUATA DÍAZ^c, LUIS OCTAVIO SOLÍS SÁNCHEZ^d, MA. DEL ROSARIO MARTÍNEZ BLANCO^d, CLAUDIA YOLANDA VALERO LUNA^e, ALAN BAÑUELOS FRIAS^e, LÁZARO CANIZALES DÁVALOS^b, LEO ALVARADO PEREA^{f*}

^a Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas", Ramon López Velarde #801, Zac., Zacatecas, 98000, México.

^b Unidad Académica de Ciencias Químicas y Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus UAZ Siglo XXI, Carr. a Guadalajara Km. 6, Ejido La Escondida, Zac., Zacatecas, 98160, México.

^c Departamento de Química de la Unidad Iztapalapa, Universidad Autónoma Metropolitana, Av. San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ra Secc., Iztapalapa, Cd. de México 09340, México.

^d Posgrado en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica / Universidad Autónoma de Zacatecas, Zac., Zacatecas, C.P. 98000, México.

^e Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Ramon López Velarde 801, Zacatecas, Zacatecas, 98000, México.

^f Unidad Académica de Ciencias Químicas, Maestría en Ciencias de la Ingeniería y Posgrados en Ingeniería y Tecnología Aplicada, Universidad Autónoma de Zacatecas, Campus UAZ Siglo XXI, Carr. a Guadalajara km 6, Ejido La Escondida, Zac., Zacatecas, 98160, México

Autor de Correspondencia: Leo Alvarado Perea (e-mail: leoap@uaz.edu.mx).

RESUMEN

La presencia de fenol en aguas residuales es un problema de preocupación ambiental debido a su persistencia y alta toxicidad, junto con la ineficiencia de los tratamientos convencionales, motiva el desarrollo de tecnologías alternativas como la fotocatalisis heterogénea para su eliminación. En este estudio, se utilizaron fotocatalizadores de Ni/MCM-41 sintetizados por los métodos de impregnación húmeda incipiente (IWI), intercambio iónico con el templante (TIE) y deposición química de vapor (CVD) para observar el efecto de la técnica de preparación en la fotodegradación de fenol. La eficiencia de los fotocatalizadores obtenidos se evaluó mediante la degradación fotocatalítica de fenol a una concentración de 40 ppm bajo luz UV y utilizando aire como agente oxidante. La degradación de fenol se midió mediante espectroscopia de UV-Vis. Los resultados obtenidos indican que la degradación fotocatalítica de fenol sí depende del método de preparación del fotocatalizador.

PALABRAS CLAVE: Fotodegradación; Ni/MCM-41; IWI; TIE; CVD.

1. INTRODUCCIÓN

El fenol y sus derivados se emplean ampliamente como materias primas en las industrias petroquímica, química y farmacéutica. Además, están presentes en diversos productos de uso cotidiano, como los desinfectantes, enjuagues bucales y productos utilizados en medicina veterinaria, entre otros [1]. La presencia de estos compuestos en las aguas residuales resultantes es un problema de preocupación ambiental y social. El fenol se absorbe con rapidez a través de la piel, lo que puede causar quemaduras cutáneas y oculares tras el contacto. La sobreexposición puede originar convulsiones, comas, cianosis e incluso la muerte [2]. Debido a su alta toxicidad, estabilidad y persistencia en el medio ambiente, aun a bajas concentraciones y durante largos periodos, se ha incentivado la búsqueda de técnicas alternativas y





eficientes para el tratamiento de aguas contaminadas [3].

El tratamiento de aguas residuales contaminadas con compuestos fenólicos representa un desafío, ya que los métodos convencionales suelen mostrar eficiencias limitadas. Por ello, en los últimos años se ha impulsado el desarrollo de técnicas alternativas de remediación ambiental, las cuales han avanzado de manera significativa [4]. Entre estas estrategias, la fotocatálisis heterogénea se reconoce como una tecnología altamente efectiva para la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en el agua [2]. La fotocatálisis se define como una reacción fotoinducida que se acelera por la presencia de un catalizador [5].

El óxido de níquel NiO es un semiconductor que ha demostrado ser uno de los mejores candidatos para la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos presentes en el agua, debido a que no es tóxico, es estable y fácilmente accesible [2]. Los soportes mesoporosos como la MCM-41, puede dar lugar a una mejora de la actividad fotocatalítica, debido a su gran área de superficie que ayuda a minimizar la recombinación de electrones (e^-) y huecos (h^+) bajo iluminaciones de luz UV/Visible [3], [6]. Los valores de band gap de MCM-41 se han reportado con los siguientes valores 5.79, 5.98 y 10.48 eV, respectivamente [7-9]. Este material mesoporoso tiene una gran energía de band gap que limita su actividad fotocatalítica, lo cual, requiere la combinación de un semiconductor. El material MCM-41 ofrece ventajas como una alta área de superficie, un gran volumen de poro, tamaño de poro uniforme y alta estabilidad térmica y química [10].

El desarrollo de nuevos materiales eficientes más allá del TiO_2 y la modificación del fotocatalizador son de gran interés actual [3]. La elección del método de síntesis afecta los parámetros fisicoquímicos del fotocatalizador y su desempeño fotocatalítico. El método más utilizado para la preparación de catalizadores es la impregnación húmeda incipiente (IWI). Debido a su simplicidad, efectividad, bajo flujo de desperdicio y bajo costo, este método es muy atractiva para muchos investigadores. Sin embargo, este método puede producir partículas de baja dispersión debido a la falta de interacción inducida entre el soporte y el precursor [11]. Existen métodos

novedosos como el intercambio iónico con la plantilla (TIE) y la deposición química de vapor (CVD) que ofrecen una mayor interacción entre el soporte y el precursor, altas dispersiones y una mayor área superficial [12].

El uso de Ni/MCM-41 como fotocatalizador para la fotodegradación de fenol no ha sido reportado en la literatura, por lo que este material se considera novedoso para esta aplicación. En este trabajo, se evalúa la influencia del método de síntesis en la preparación de los fotocatalizadores Ni/MCM-41, comparando un método convencional —la impregnación húmeda incipiente (IWI)— con dos métodos novedosos en el campo de la fotocatálisis: el intercambio iónico con el template (TIE) y la deposición química de vapor (CVD).

2. METODOLOGÍA

El material mesoporoso MCM-41 fue preparado por el método modificado por Alvarado L. et al. [13]. Se utilizó nitrato de níquel (Merck, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O \geq 99.0\%$) como precursor de níquel para los métodos TIE e IWI. Se utilizó la metodología de TIE descrita por Iwamoto et al. [14], para incorporar el níquel en la estructura mesoporosa del MCM-41. De acuerdo al método IWI, el soporte MCM-41 se impregnó con Ni disolviendo una cantidad conveniente de precursor para cargar el 4% p/p de níquel, en donde el volumen de la solución de metal cargada fue igual al volumen del poro utilizado del soporte. Después de la impregnación, el fotocatalizador se secó a $105^\circ C$ durante 24 h y se calcinó a $600^\circ C$ por 6 h, con una rampa de calentamiento de $5^\circ C/min$. Para la síntesis del fotocatalizador por CVD, se empleó como precursor el acetilacetato de níquel ($Ni(acac)_2$, Sigma Aldrich, 95%), para cargar el 4% p/p de níquel. El soporte fue pretratado a $120^\circ C$ por 24 h para desorber la humedad presente. Después, se hizo pasar un flujo de nitrógeno de 10 mL/min, durante 30 min, para purgar el soporte y el reactor. El precursor se sublimó a $220^\circ C$ y se descompuso sobre la MCM-41 a $350^\circ C$ durante 180 min y se calcinó a $600^\circ C$ por 6 h.

Los experimentos fotocatalíticos se realizaron utilizando soluciones de 40 mg/L de fenol, en un





reactor batch con una capacidad de 200 mL, en donde se suspendieron 0.2 g de fotocatalizador. El reactor cuenta con una doble pared que permite el enfriamiento mediante el flujo de agua, lo que mantiene constantes la temperatura, la presión y el burbujeo de oxígeno durante la reacción. Cada foto-reacción fue monitoreada por un tiempo total de 7 h, bajo agitación continua de 300 rpm y utilizando una lámpara UV que se encuentra suspendida en posición vertical, centrada y sumergida en el reactor dentro de un tubo de inmersión de cuarzo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra la degradación de fenol empleando únicamente el soporte MCM-41 y el proceso de fotólisis. Después de 420 min de reacción, el material alcanzó una degradación del 22.85%, mientras que la fotólisis únicamente logró un 13.77%.

Estos resultados evidencian que, aunque el soporte MCM-41 por sí solo no presenta una elevada actividad fotocatalítica, sí contribuye a una mayor remoción del contaminante en comparación con la acción de la radiación UV sin fotocatalizador. La ligera ventaja que presenta el MCM-41 puede explicarse por sus propiedades texturales, ya que su alta área superficial y estructura mesoporosa facilitan la adsorción del fenol y de los intermediarios, promoviendo un contacto más cercano con las especies generadas por la radiación UV. Aunque este material carece de actividad catalítica [15], su capacidad de adsorción permite aumentar la disponibilidad del contaminante en la superficie y la presencia de especies ricas en oxígeno dentro de la estructura mesoporosa, favoreciendo la degradación parcial [6].

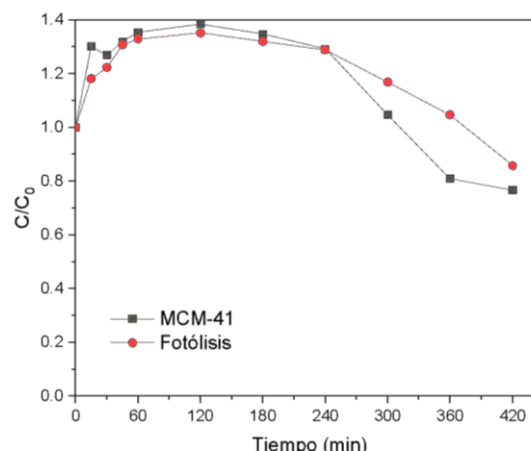


Figura 1 Variación de C/C_0 durante la fotodegradación de fenol en función del tiempo durante la fotólisis y utilizando MCM-41.

La Figura 2 muestra la relación C/C_0 en función del tiempo de la fotodegradación de fenol utilizando Ni/MCM-41 sintetizados por los métodos de TIE, IWI y CVD. Se observa que los materiales preparados por TIE y CVD alcanzaron altas tasas de degradación después de 420 min de reacción, con eficiencias de 92.45% y 97.28%, respectivamente. En contraste, el fotocatalizador sintetizado por el método IWI presentó una degradación significativamente menor de 29.11%, lo que pone en manifiesto la influencia del método de síntesis sobre el desempeño fotocatalítico en la degradación de fenol.

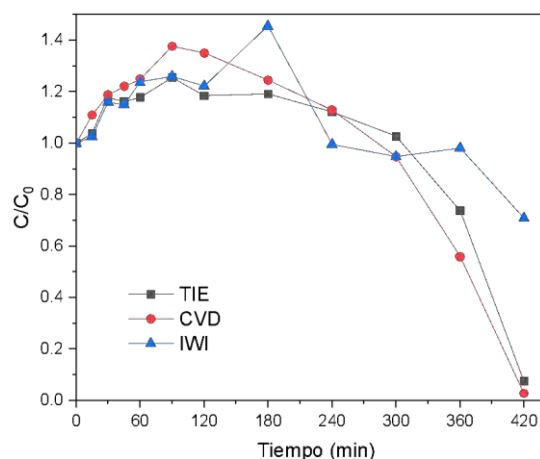


Figura 2 Variación de C/C_0 durante la fotodegradación de fenol en función del tiempo utilizando Ni/MCM-41 preparado por TIE, IWI y CVD.





El comportamiento inicial de los cinco experimentos es el incremento inicial de C/C_0 durante los primeros 300 min, lo que sugerimos la formación de intermediarios que se absorben cerca de la región del espectro UV-Vis que el fenol. Este fenómeno ha sido ampliamente reportado en la literatura ya que, durante la fotodegradación de fenol se han utilizado varios fotocatalizadores, y se forman principalmente intermediarios como la hidroquinona, catecol y benzoquinona, que pueden detectarse mediante espectrofotometría UV a longitudes de onda de 290 nm, 275 nm y 255 nm, respectivamente [16], [17]. Además, se ha observado por espectroscopia de UV-Vis el incremento inicial de la absorbancia y se atribuye a la formación de estos intermediarios aromáticos, cuyos picos característicos en UV-Vis generan un aumento de la señal durante la reacción, tal como ha sido reportado por Dutta J. et al. [16]

La superioridad de los métodos TIE y CVD frente al IWI puede explicarse porque permiten una mayor interacción entre el precursor y el soporte, favoreciendo la obtención de partículas de Ni altamente dispersas y una mejor accesibilidad de los sitios activos. Además, estos métodos contribuyen a mantener elevadas áreas de superficies en comparación con el método IWI, en la cual frecuentemente se generan partículas aglomeradas y una menor uniformidad en la distribución del Ni en la superficie del soporte mesoporosa.

Los resultados de este trabajo con la literatura [18] coinciden en señalar que CVD es un método superior al método IWI en la síntesis de catalizadores destinados a procesos de oxidación avanzada, lo que explica los porcentajes de degradación obtenidos con Ni/MCM-41 preparados por CVD frente a un método convencional.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo, se evaluó el fotocatalizador Ni/MCM-41 preparado por diferentes métodos de síntesis: TIE, IWI y CVD en la degradación fotocatalítica de fenol. Los resultados demostraron que los métodos de síntesis influyen significativamente en el desempeño fotocatalítico. Los métodos novedosos como CVD y TIE mostraron una mayor eficiencia, logrando una degradación del 97.28 y 92.45%, respectivamente. La

superioridad de estos métodos se debe a que promueven una mayor interacción entre el soporte y el precursor, obteniendo materiales altamente dispersos y con altas áreas superficiales.

Para sustentar estos resultados, se complementará el estudio con técnicas de caracterización como DRX, BET, FTIR, SEM/TEM, UV-Vis que nos permitirá correlacionar las propiedades del fotocatalizador con el desempeño observado en la degradación.

Para la identificación de los compuestos fenólicos durante las reacciones fotocatalíticas se realizará mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Y para comprobar que el proceso de mineralización del contaminante orgánico se lleva a cabo se realizará un análisis de Carbono Orgánico Total (COT). Puesto que, la formación de compuestos intermedios durante la fotodegradación de fenol representa un riesgo al emplear por sí sola la espectrofotometría UV-Vis para la determinación de la concentración de fenol.

AGRADECIMIENTOS

La autora Esquivel Y. agradece al Dr. Perea L. y la Dra. Romero L. por su orientación y valiosos comentarios/sugerencias durante la realización de este trabajo. Finalmente, el autor reconoce al laboratorio de Síntesis y Transformaciones Orgánicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas por facilitar el acceso a sus equipos y materiales para la realización de los experimentos.

REFERENCIAS

- [1] H. Services, "TOXICOLOGICAL PROFILE FOR PHENOL," no. September, 2008.
- [2] G. Busca, S. Berardinelli, C. Resini, and L. Arrighi, "Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments," vol. 160, pp. 265–288, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.045.
- [3] K. Hayat, M. A. Gondal, M. M. Khaled, S. Ahmed, and A. M. Shemsi, "Nano ZnO synthesis by modified sol gel method and its application in heterogeneous photocatalytic removal of phenol from water," *Appl*





- Catal A Gen*, vol. 393, no. 1–2, pp. 122–129, 2011, [14] doi: 10.1016/j.apcata.2010.11.032.
- [4] J. J. M. Mesa, J. A. G. Arias, H. A. Rojas, and O. E. C. Espinosa, “Photocatalytic degradation of Phenol, Catechol and Hydroquinone over Au-ZnO nanomaterials,” *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 94, pp. 24–32, 2020, doi: 10.17533/udea.redin.20190513.
- [5] A. Mills and S. Le Hunte, “An overview of semiconductor photocatalysis,” 1997.
- [6] G. R. Reddy *et al.*, “Removal of organic pollutants in water by the MCM-41 anchored with nickel (II) and copper (II) complexes,” *Environ Technol Innov*, vol. 22, May 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101492.
- [7] R. K. Khaled, M. A. Wahba, M. D. Badry, M. F. Zawrah, and E. A. Heikal, “Highly ordered pure and indium-incorporated MCM-41 mesoporous adsorbents: synthesis, characterization and evaluation for dye removal,” *J Mater Sci*, vol. 57, no. 7, pp. 4504–4527, Feb. 2022, doi: 10.1007/s10853-022-06877-7.
- [8] M. A. Wahba and R. K. Khaled, “V/Zn Incorporated-MCM-41: Synthesis, Characterization and Visible Light Photocatalytic Activity for Tetracycline Degradation,” *J Inorg Organomet Polym Mater*, vol. 35, no. 6, pp. 4445–4464, Jun. 2025, doi: 10.1007/s10904-024-03533-2.
- [9] N. T. T. Ha *et al.*, “Comprehensive Study on the Adsorption and Degradation of Dichlorodiphenyltrichloroethane on Bifunctional Adsorption-Photocatalysis Material TiO₂/MCM-41 Using Quantum Chemical Methods,” *ACS Omega*, 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c08050.
- [10] Q. Wu, X. Hu, P. Lock, X. Song, and G. Qing, “Copper / MCM-41 as catalyst for the wet oxidation of phenol,” vol. 32, pp. 151–156, 2001.
- [11] I. U. Din, Q. Nasir, M. D. Garba, A. I. Alharthi, M. A. Alotaibi, and M. Usman, “A Review of Preparation Methods for Heterogeneous Catalysts,” no. 1, pp. 92–110, 2022, doi: 10.2174/1570193X18666210308151136.
- [12] S. L. Wegener, T. J. Marks, and P. C. Stair, “Design strategies for the molecular level synthesis of supported catalysts,” *Acc Chem Res*, vol. 45, no. 2, pp. 206–214, 2012, doi: 10.1021/ar2001342.
- [13] A. S. L. Alvarado, T. Wolff, P. Veit, L. Hilfert, F. Edelmann, C. Hamel, “Alumino-mesoporous Ni catalysts for the direct conversion of ethene to propene,” *J Catal*, vol. 305, pp. 154–168, 2013, doi: 10.1016/j.jcat.2013.05.007.
- M. Yonemitsu, Y. Tanaka, and M. Iwamoto, “Metal Ion-Planted MCM-41. 1. Planting of Manganese (II) Ion into MCM-41 by a Newly Developed Template-Ion Exchange Method,” *Chemistry of Materials*, vol. 9, no. 12, pp. 2679–2681, 1997, doi: 10.1021/cm970334w.
- J. Mokrzycki *et al.*, “Mesoporous Silica MCM-41 from Fly Ash as a Support of Bimetallic Cu/Mn Catalysts for Toluene Combustion,” *Materials*, vol. 17, no. 3, Feb. 2024, doi: 10.3390/ma17030653.
- A. M. Al-Hamdi, M. Sillanpää, and J. Dutta, “Intermediate formation during photodegradation of phenol using lanthanum doped tin dioxide nanoparticles,” *Research on Chemical Intermediates*, vol. 42, no. 4, pp. 3055–3069, Apr. 2016, doi: 10.1007/s11164-015-2197-9.
- D. He, H. Zhang, and Y. Yan, “Chemical vapor deposition of CuO on ZSM-5 membrane for catalytic wet peroxide oxidation of phenol in a fixed bed reactor,” *RSC Adv*, vol. 7, no. 75, pp. 47435–47447, 2017, doi: 10.1039/c7ra09676c.

Yulissa Aleli Esquivel Corona. La M. en C. es estudiante del doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada en la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zac., Zac., México. Obtuvo su Licenciatura en Ingeniería Química en la Universidad Regiomontana, Mty., Nuevo León, México, en 2021; su Maestría en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zac., Zacatecas, México, en 2024. Su área de investigación se centra en el desarrollo de materiales fotocatalíticos para aplicaciones ambientales. Ha participado en congresos nacionales e internacionales, destacando su participación durante las XV Jornadas Químicas en el marco 60 aniversario de la Unidad Académica de Ciencias Químicas UAZ, llevado a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Zacatecas, obteniendo el primer lugar en el concurso de carteles científicos en la categoría de investigación, nivel maestría, con el tema “Diseño modificado de un reactor CVD térmico para la síntesis de catalizadores”. Segundo lugar en Premio Juventud Municipal de Fresnillo, Zacatecas. En la categoría de Ciencia y Tecnología presentando el Proyecto de Maestría “Diseño de un Sistema de Deposición Química de Vapor (CVD) para la Síntesis de Catalizadores”.





Industrial waste heat recovery technologies assessment and their applicability in the manufacturing sector from Nuevo León

ASTRID MONTROYA-CRUZ¹, VALERIA ALESSANDRA ZAMUDIO-RENDON¹, VICTORIA LIVAS-LOPEZOLIVERA¹, MARCELA MEIXUEIRO-DOÑAZ¹, MARÍA GUADALUPE PAREDES-FIGUEROA¹, SANTIAGO RODRÍGUEZ-VALDERRAMA, ^{*1}.

¹ School of Engineering and Technologies, Universidad de Monterrey, San Pedro Garza García C.P. 66238

Corresponding author: Santiago Rodríguez Valderrama (e-mail: santiago.rodriguezvalderrama@udem.edu).

This work was supported in part by the **Universidad of Monterrey**.

ABSTRACT This study evaluates the potential Waste Heat Recovery (WHR) technologies have in the manufacturing industries in Nuevo Leon, México. Five key industries with thermal demand were identified and analyzed: the basic metals industry, chemical industry, food industry, paper industry, and non-metallic minerals industry. Together, these industries account for a total heat demand of 196.22 PJ per year, equivalent to 18.7% of the national industrial heat consumption. Heat maps were generated in QGIS using data from INEGI to represent the heat demand and temperature profiles of each industry. The largest consumer was the Basic metals industry, with 101.51 PJ per year. In order to assess the electricity generation potential, the basic metals industry was analyzed through a simulation of an Organic Rankine Cycle (ORC). According to the simulation results, the adoption of ORC technology by all industrial plants with comparable conditions could lead to a reduction of approximately 4% in Nuevo León's electrical demand.

INDEX TERMS Energy efficiency, Industry, Waste Heat Recovery.

I. INTRODUCTION

Industrial plants continuously release large amounts of thermal energy commonly referred to as industrial waste heat (IWH). IWH is typically found in radiation processes,

coolants, and exhaust gases, all of which contain significant exergy. The most common sources of industrial heat loss include furnaces, wastewater from washing, drying, cooling processes, and exhaust gases from manufacturing plants (IPCC, 2011). Waste heat is generally classified into three categories: high (>400 °C); medium (100-400 °C); and low (<100) [3].

The efficient use of resources reduces primary energy consumption and, consequently, greenhouse gas emissions. Recovering and utilizing heat losses also provides an economic benefit, as these losses are typically included into the final cost of products [1].

Given this potential, waste heat recovery systems (WHR) aim to capture otherwise wasted energy and transform it into a useful resource for industrial operations. WHR technologies redirect heat back into the system, either as direct thermal input or as electricity generation [4].

The main objective of this research is to evaluate the potential energy efficiency improvements in key industries in Nuevo León through the implementation of WHR technologies for reuse in operational processes. Specifically, the study seeks to identify the main industries in the region with the highest potential for utilizing waste heat in their production processes. The WHR potential for the selected sectors is quantified using existing baseline data adapted to the Nuevo León context. Finally, a simulation of the industry with the greatest heat demand and the most suitable WHR technology is conducted to estimate the recoverable energy and its contribution to the national electrical grid.





II. METHODOLOGY

Key industries in Nuevo Leon were identified based on their process temperature profiles. The selection criteria considered both the energy intensity of industrial processes and the contribution of these sectors to the state's economy, with the objective of targeting those industries offering the greatest potential for energy efficiency improvements.

1. A review of the scientific literature was conducted to identify existing types of ORC simulations and to define the response variables and expected outcomes, such as recoverable energy potential and achievable energy efficiency.
2. Using this information, heat maps were developed to identify the most heat-demanding industries, which were then designated as key industries.
3. The most significant industry was subsequently selected as a reference case, and the most suitable waste heat recovery (WHR) technology was chosen to evaluate potential improvements after implementation.
4. Evaluation criteria included energy efficiency, energy recovery rate, and compatibility with the operational processes of the selected industries. This approach enabled an estimation of the opportunities to optimize energy efficiency in key industries in Nuevo León through WHR technologies.

The categorization method employed was INEGI's North American Industry Classification System (SCIAN), which assigns a specific code to each of the country's economic activities. For this study, all industries within the manufacturing sector (SCIAN codes 31–33) were taken as the starting point. An initial filter was then applied to identify companies that employ thermal processes in their operations, considering both their operating temperatures and their energy intensity (data from SENER and CONUEE, 2017). In addition, industries with the highest contribution to the economy of Nuevo León were prioritized [11].

The equations used in the study were the following:

$$P_i = P_{N,i} \times \frac{E_{NL,i}}{E_{N,i}}, \quad 1$$

Where $P_{N,i}$ is the annual national production of products by industry (t), $E_{NL,i}$ is the annual economic contribution of Nuevo León by industry (MX), and $E_{N,i}$ is the total annual national economic output by industry (MX).

$$Q_d(P) = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{d,i} \times P_i}{a} \quad 2$$

Where $Q_{d,i}$ is the heat demand by industry (MJ/t), P_i is the annual production of products by industry in tons in Nuevo León (t), i is the Different types of industries index (manufacture of non-metallic mineral products, chemical industry, food industry, paper industry, or basic metal industries) and a is a conversion factor (1,000,000,000 MJ/PJ).

III. RESULTS

A. Heat in the Monterrey Metropolitan Area

To better understand the magnitude of the manufacturing industry in the Monterrey Metropolitan Area (MMA), several maps were generated in QGIS. The information was obtained from the National Statistical Directory of Economic Units (DENEUE), operated by the National Institute of Statistics and Geography [8]. The study focused on companies with a workforce of 101 employees or more, as well as those employing thermal processes in their production, according to previous bibliographic research. This selection resulted in a total of 751 companies within the MMA.

The main industries identified with the greatest potential for heat recovery were the basic metals industry (331), food industry (311), paper industry (322), chemical industry (325), and the manufacture of mineral and non-metallic products (327) (Bank of Mexico, 2022). Figure 1 illustrates the temperature ranges of these five key categories.

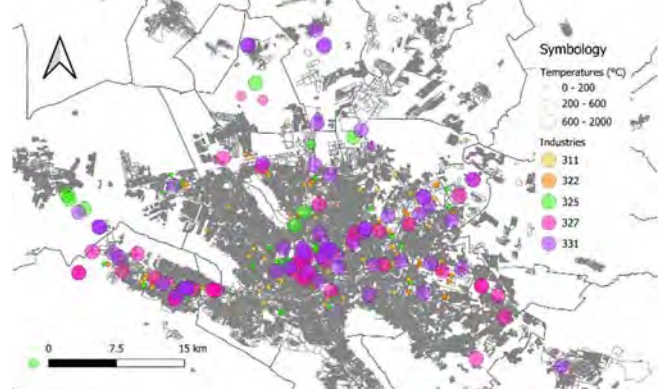


FIGURE 1. Temperature distribution heat map across key industrial sectors in the Monterrey Metropolitan Area.

B. Quantification of heat demand

To quantify the approximate current heat demand in Monterrey's manufacturing industries, the industry list was filtered and companies were grouped by subsector according to the first four digits of the SCIAN classification. The subsectors were then analyzed to determine the heat demand per ton produced (MJ/ton). In the absence of direct data,



annual production per industry in Nuevo León was estimated by adjusting national and state-level monetary production data (MMXN) from INEGI (2019) and converting it into tons using Equation 1.

A literature review provided heat demand values per ton for each industry, which were multiplied by the annual production in Nuevo León and converted to Petajoules (PJ) (Figure 2). The quantification results for the five key industries in the state are summarized below:

1. Basic metals industry (SCIAN 331): With a total production exceeding 7 million t, this industry has the highest thermal demand at 101.51 PJ per year. The main consumers within this sector are the manufacture of iron and steel products (83.59 PJ), aluminum (9.851 PJ), and metal casting (7.025 PJ), reflecting thermal processes operating above 1400 °C, such as electric arc furnaces, smelting, and continuous heat treatments.
2. Food industry (SCIAN 311): Total thermal demand amounts to 51.71 PJ per year.
3. Chemical industry (SCIAN 325): Total demand is 19.23 PJ per year. Despite lower production volumes in some subsectors, this industry exhibits high thermal intensity. The primary consumers are the manufacture of paints, coatings, and adhesives (16.80 PJ), followed by chemical fibers (1.936 PJ), involving processes such as polymerization, distillation, thermal curing, solvent evaporation, and drying.
4. Non-metallic mineral products industry (SCIAN 327): Total thermal demand reaches 16.70 PJ per year. The main consuming subsectors are glass and glass products (7.69 PJ) and cement and concrete (6.51 PJ), which involve calcination and melting of raw materials, generating continuous flows of hot gases.
5. Paper industry (SCIAN 322): The lowest contributor, with 7.07 PJ per year, concentrated in pulp, paper, and cardboard manufacturing (6.44 PJ), involving processes such as pulp cooking, cylinder drying, and sheet pressing. Together, these five key industries account for an estimated total thermal demand of 196.22 PJ per year. This figure underscores their strategic importance in the energy context of Nuevo León and highlights the substantial potential for improving energy efficiency and promoting sustainability by recovering the waste heat generated across their industrial processes.

Figure 3 highlights the areas with the highest thermal demand, with values approaching 80,000 MJ/t. These locations correspond to municipalities with a strong presence of the basic metals, food, and chemical industries, including Apodaca, Santa Catarina, San Nicolás de los Garza, Escobedo, and García, which exhibit a high density of intensive thermal processes. This analysis enables the identification of regions with significant potential for the

implementation of waste heat recovery (WHR) systems, providing valuable guidance for future technological interventions, feasibility studies, and the development of integrated solutions aimed at promoting a transition toward more sustainable industrial practices.

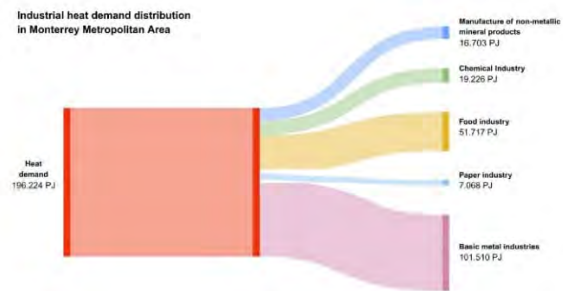


FIGURE 2. Sankey diagram representing the allocation of thermal energy demand across key industrial sectors in Nuevo León.

According to the National Council for Science and Technology [7], the industrial sector is the second-largest energy consumer in Mexico, accounting for 33.4% of the total 4,760 PJ, which corresponds to 1,589.84 PJ consumed by industry. Given that approximately two-thirds of industrial energy consumption is associated with thermal processes, the national industrial heat demand is estimated at 1,049.29 PJ per year. The quantified heat demand of 196.22 PJ per year in Nuevo León thus represents 18.7% of the national total.

It should be noted that the data used in this analysis may be subject to certain limitations due to the lack of comprehensive public data at the national level. While this may affect the absolute precision of the estimates, the results remain useful for providing a general overview of the state's energy context and for identifying trends that inform an assessment of its competitiveness within Mexico.

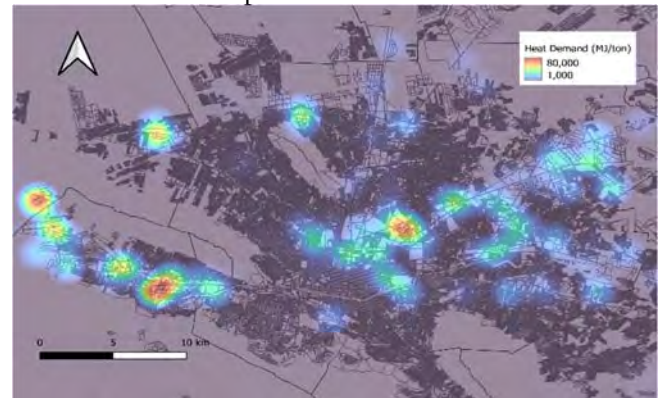


FIGURE 3. Map illustrating the spatial distribution of heat demand across key manufacturing sectors in the Monterrey Metropolitan Area (MMA).



C. WHR simulation

Based on these results, the basic metals industry—characterized by the highest heat demand and the greatest availability of data—was selected for simulating the implementation of waste heat recovery (WHR) technology using the open-source software DWSIM. A steel plant was chosen as a case study due to its high energy demand and data availability. The technology selected for this simulation was the Organic Rankine Cycle (ORC), owing to its technical and environmental suitability for medium-temperature heat recovery.

Operating parameters from a study conducted in the Republic of Korea were used as a reference, in which a 200 kW ORC system was designed to utilize waste heat from the exhaust gases of rolling mills, reaching temperatures of approximately 100 °C [5]. Figure 4 illustrates the system diagram, where thermal flows are harnessed via various heat exchangers. Under these conditions, the simulation evaluated the performance of the ORC system, aiming to determine its potential for recovering electrical energy from industrial waste heat. This approach enables the assessment of its contribution to reducing energy demand and optimizing heat utilization in industrial processes within the context of Nuevo León.

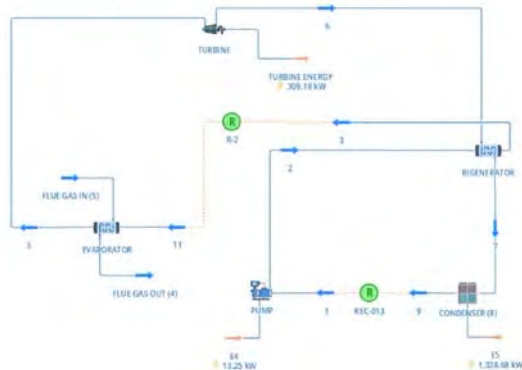


FIGURE 4. Simulation of an Organic Rankine Cycle (ORC) developed and analyzed in the DWSIM environment. (Source: Authors' elaboration)

The simulation yielded 309.18 kW of electrical power generated by the ORC system. Based on literature, it was assumed that a rolling mill of this type operates 19.6 h per day [11], corresponding to 6,059.93 kWh of recovered electrical energy, excluding system failures, operational errors, and other potential limitations.

A combined cycle recovery was also considered to evaluate whether system efficiency could be increased by recovering not only the electrical output but also the heat from the condenser, which was 1,326.18 kW according to the E5 measurement of the simulated system. Combining both energy streams results in a total of 1,637.56 kW, which, when divided by the energy available in the exhaust gases, corresponds to an ORC system efficiency of 36%. Thus, the

recovery of both electrical and thermal energy could lead to higher overall system efficiency, recirculating more energy than a conventional ORC system. However, this alternative was not analyzed in detail due to limitations of the DWSIM simulation software; it is presented only to illustrate the potential benefits of enhanced heat recovery

D. Benefit to the electrical grid

The Nuevo León Renewable Energy Agency estimates that 1,200 MW will be required over the next three years to meet the state's electricity demand. This estimate was used to quantify the potential contribution of ORC systems as a waste heat recovery (WHR) strategy. According to CONACYT's National Strategic Programs for a Fair and Sustainable Energy Transition (2019), Mexico's total energy consumption is 4,760 PJ, with 33.4% consumed by industry and 20% by the residential and commercial sectors. Based on this distribution, it is estimated that 400.8 MW of the future demand in Nuevo León will correspond to the industrial sector, equivalent to 3,511,008 MWh per year.

The ORC system considered in this study produces 6,059.93 kWh per day, which corresponds to 2,211.87 MWh per year when operating 365 days annually. Focusing on the main companies with the greatest potential for heat recovery and filtering by number of employees, 13 industrial plants were identified as having rolling mills similar to those in the simulation. Multiplying the annual generation by these 13 plants yields a total of 28,754.37 MWh per year. This corresponds to a reduction of approximately 0.818% in the state's future electricity demand for these key rolling mills.

Considering rolling mills alone, the application of ORC systems could reduce electricity demand by nearly 1%. Expanding the analysis to the 64 companies with the highest heat demand in the basic metals industry, and assuming they all operate similar rolling processes, the potential reduction in future electricity demand rises to approximately 4%, equivalent to 1,152 MW.

IV. CONCLUSIONS

The analysis of waste heat recovery (WHR) in the manufacturing sector of industrial states such as Nuevo León is crucial for the transition toward a sustainable electricity system. WHR technologies vary according to the specific needs and characteristics of each industry, with options including heat exchangers, heat pumps, cogeneration systems, the Organic Rankine Cycle (ORC), and heat storage technologies, among others.

To quantify the potential for electricity generation, simulations were conducted, resulting in a recovery of 28,754.37 MWh/year through the implementation of ORC





systems in the rolling processes of 13 industrial plants in Nuevo León. This corresponds to a reduction of 0.818% of the future electricity demand of 1,200 MW estimated by the state's Renewable Energy Agency, considering the limited number of machines analyzed. Expanding the application to the 64 companies operating in the basic metals sector could potentially reduce demand by 4%.

ORC-based heat recovery systems in the basic metals industry have demonstrated technical and economic viability as a strategy to support part of the energy needs of Nuevo León's industrial sector. With continued industrial growth and the arrival of new manufacturing companies, the implementation of WHR systems could enable these companies to differentiate themselves in the market as innovative and sustainable.

In this context, waste heat recovery represents a key strategy for optimizing energy use, reducing operational costs, and lowering the industrial sector's carbon footprint. This study highlights the importance of exploring alternative energy sources across industries with high energy demand and encourages the development of roadmaps for future projects. The energy future of both Nuevo León and Mexico depends on the commitment and collaboration of the public, government, and industry to advance toward a more sustainable future.

REFERENCES

Papers

- [1]. Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., Hosenuzzaman, M., Saidur, R., Mahbubul, I. M., & Rashid, M. M. (2012). *Energy savings in the combustion based process heating in industrial sector*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(7), 4527-4536.
- [2]. Hashimoto, S., Fujita, T., Geng, Y., & Nagasawa, E. (2010). *Realizing CO₂ emission reduction through industrial symbiosis: A cement production case study for Kawasaki*. Resources, Conservation and Recycling, 54(10), 704-710. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.007>
- [3]. 704-710. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.007>
- [4]. Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. Thermal science and engineering progress, 6, 268-289.
- [5]. Rivolta, G. (2018). Heat recovery. International Paper Board Industry, 61(2), 52-54.

- [6]. Sung, T., Yun, E., Kim, H. D., Yoon, S. Y., Choi, B. S., Kim, K., ... & Kim, K. C. (2016). *Performance characteristics of a 200-kW organic Rankine cycle system in a steel processing plant*. Applied energy, 183, 623-635.

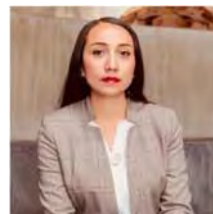
Government resources

- [7]. Banco de México. (2022). *Eficiencia energética y desempeño ambiental del sector manufacturero en las regiones de México. Reporte sobre las economías regionales Julio - Septiembre 2022*, Recuadro 4, pp. 64-66. <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/reportes-sobre-las-economias-regionales/recuadros/%7B6EECBB21-A9D5-2722-876F-0D7F7BF99642%7D.pdf>
- [8]. CONACYT. (2019). *Energía verde y eficiencia para el sector industrial, comercial y residencial*. SECIHTI. https://secihti.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/policy_briefs/Policy_Brief_III_Pronaces_ECC.pdf
- [9]. INEGI. (2024). *Censos Económicos 2024: Documentación*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2024/#documentacion>
- [10]. IPCC (2011) Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren_report_es-1.pdf
- [11]. Secretaría de Economía. (2019). Nuevo León (NL). Data México. Gobierno de México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profil/geo/nuevo-leon-nl>

Books

- [12]. Chakraborty, S. (2014). Case Study 2 - Ferrous Metallurgical Process Industry: Visakhapatnam Steel Plant - From Conceptualization to Commissioning. In *Treatise on Process Metallurgy: Vol. 3. Industrial Processes* (pp. 1341-1374).

María Guadalupe Paredes-Figueroa, Full-Time Research Professor, School of Engineering and Technologies, Universidad de Monterrey, Av. Ignacio Morones Prieto 4500-Pte, Zona Valle Poniente, 66238 San Pedro Garza García, N.L., Mexico; Email: maria.paredesf@udem.edu; Tel.: +52 55 3101 7022





Santiago Rodríguez-Valderrama,

Full-Time Research Professor, School of Engineering and Technologies, Universidad de Monterrey, Av. Ignacio Morones Prieto 4500-Pte, Zona Valle Poniente, 66238 San Pedro Garza García, N.L., Mexico; Email: santiago.rodriguezvalderrama@udem.edu; Tel.: +52 812 105 9260



Astrid Liseth Montoya Cruz, Student of engineering in

Sustainable Innovation and Energy, Universidad de Monterrey. School of Engineering and Technology. Av. Ignacio Morones Prieto 4500-Pte, Zona Valle Poniente, 66238 San Pedro Garza García, N.L, astrid.montoya@udem.edu +52



8115099010

Victoria Livas Lopezolivera, Student of engineering in

Sustainable Innovation and Energy, Universidad de Monterrey, School of Engineering and Technology, Av. Ignacio Morones Prieto 4500-Pte, Zona Valle Poniente, 66238 San Pedro Garza García, N.L, victoria.livas@udem.edu, +52 811 896 7591



Marcela Meixueiro Doñaz, Student of engineering in

Sustainable Innovation and Energy, Universidad de Monterrey. School of Engineering and Technology. Av. Ignacio Morones Prieto 4500-Pte, Zona Valle Poniente, 66238 San Pedro Garza García, N.L, marcela.meixueiro@udem.edu +52 811 034 6369



Valeria Alessandra Zamudio

Rendón, Student of engineering in Sustainable Innovation and Energy, Universidad de Monterrey. School of Engineering and Technology. Av. Ignacio Morones Prieto 4500-Pte, Zona Valle Poniente, 66238 San Pedro Garza García, N.L, valeria.zamudio@udem.edu +52 867 242 8861





Modelos comunitarios de generación distribuida para una transición energética justa en México

NIUNI BUTRÓN, LUISA SIERRA, YOTZELIN SALDAÑA, JULY PUENTES

¹Gerencia de Implementación de Proyectos de Energía, Instituto de Desarrollo Energía y Ambiente, A.C. Miguel Laurent #70, Alvaro Obregón, Ciudad de México, 03100, México.

Autor de Correspondencia: Niuni Butrón Álvarez (e-mail: Niuni.Butron@ideathinktank.org.mx).

RESUMEN México enfrenta actualmente el reto de transformar su sistema energético en uno más justo, sostenible, resiliente y alineado con el objetivo de alcanzar emisiones netas cero, particularmente en beneficio de las comunidades rurales y marginadas que, de manera histórica y estructural, han sido excluidas del acceso a energía limpia, asequible y confiable. Esta exclusión ha profundizado las brechas de desigualdad y desarrollo, incrementando la vulnerabilidad frente a los impactos de la crisis climática y limitando su participación en los beneficios de la transición energética. En este escenario, el Instituto de Desarrollo Energía y Ambiente (IDEA) y la Iniciativa Climática de México (ICM), han puesto en marcha una serie de estrategias prácticas que han derivado en la implementación de modelos de Generación Distribuida Comunitaria (GDC). Estos modelos buscan colocar a las comunidades como actores centrales en el desarrollo, toma de decisiones y gestión de los proyectos, reconociéndolas como agentes de cambio de sus entornos, mediante esquemas de gobernanza local inclusiva, financiamiento adaptado a sus contextos y procesos que aseguren beneficios sociales tangibles. La metodología utilizada se estructura en cinco pilares: diagnóstico participativo, diseño de modelos operativos y financieros, esquemas de contraprestación, articulación institucional, y fortalecimiento de capacidades técnicas y sociales. Con base en estos elementos, se han desarrollado experiencias concretas como los programas Ejido Solar y Hogares Solares, que han demostrado que la generación distribuida comunitaria no sólo es técnicamente viable, sino que constituye una vía concreta y estratégica para diversificar y descentralizar la generación eléctrica, contribuyendo a fortalecer la resiliencia local y a avanzar en una transición energética verdaderamente justa e inclusiva.

PALABRAS CLAVE: Generación de energía comunitaria, Transición energética justa, Energías renovables, Proyectos comunitarios, Gobernanza energética.

1. INTRODUCCIÓN

Las modificaciones regulatorias de los últimos lustros, han abierto la puerta a nuevos modelos que combinan justicia social, sostenibilidad ambiental y participación activa de las comunidades. Entre ellos destacan la generación distribuida (GD) y el autoconsumo, que han permitido la descentralización del sistema eléctrico y facilitado el despliegue de soluciones energéticas sostenibles al interior de las comunidades.

En este contexto, resulta fundamental distinguir entre tres conceptos relacionados, pero no equivalentes, la generación distribuida (GD) convencional se refiere a la instalación de sistemas de pequeña o mediana escala interconectados a la red eléctrica, cuyo objetivo principal es reducir costos o complementar la generación centralizada.

La generación distribuida comunitaria (GDC), entendida aquí como una propuesta metodológica aplicada por IDEA–ICM, comparte la lógica técnica de la GD pero incorpora elementos organizativos, sociales y financieros para habilitar la gestión colectiva de los sistemas y la distribución equitativa de beneficios, articulando modelos participativos de gobernanza y toma de decisiones.

Por su parte, el concepto más amplio de energía comunitaria, también desarrollado desde el enfoque estratégico de IDEA–ICM, abarca iniciativas en las que las comunidades ejercen control democrático sobre los recursos energéticos,





incluyendo procesos, modelos institucionales y mecanismos de gobernanza, aun cuando estos no se estructuren bajo esquemas formales de GD, priorizando la autonomía energética y la apropiación social de dichos recursos.

En este sentido, la GDC se plantea como una vía concreta para materializar esta transición. A través de proyectos en los que las comunidades participan directamente en el diseño, la gestión y el aprovechamiento de los sistemas energéticos. La GDC fortalece la soberanía energética local, estimula economías circulares, promueve una participación equitativa y desarrolla capacidades técnicas desde lo comunitario.

IDEA e ICM, han diseñado e implementado una metodología específica para estructurar este tipo de proyectos. Esta metodología integra componentes técnicos, organizativos, financieros, sociales y normativos, adaptados a las distintas realidades territoriales.

El presente artículo describe dicha metodología, los aprendizajes obtenidos durante su implementación y los principales resultados de casos emblemáticos, a través de los cuales se pretende aportar a la construcción de un paradigma energético más justo, descentralizado y sostenible.

2. PRINCIPIOS Y METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ENERGÍA COMUNITARIA

2.1. Principio de Transición Energética Justa

El impulso de IDEA para estructurar proyectos de generación distribuida comunitaria parte de un principio rector compartido con ICM: la transición energética debe ser justa, incluyente y sostenible. ICM entiende la transición energética justa como un proceso gradual y participativo de transformación de un modelo energético basado en los combustibles fósiles a uno descarbonizado, que busca atender la emergencia climática, reducir las desigualdades estructurales y mejorar el bienestar y calidad de vida de las personas, al mismo tiempo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

Esta transición implica, además, tres compromisos fundamentales: (1) reconocer, mitigar y remediar los impactos diferenciados del modelo energético actual y los que surgen durante el proceso de transición, en personas, territorios, sectores y ecosistemas, con énfasis en los más

vulnerables; (2) distribuir de manera equitativa los costos y beneficios del proceso entre sectores y actores sociales; y (3) democratizar la toma de decisiones mediante una participación sustantiva y efectiva de todas las personas y comunidades involucradas o potencialmente afectadas.

Desde esta perspectiva, los proyectos de generación distribuida comunitaria no se conciben como intervenciones técnicas aisladas, sino como mecanismos concretos para materializar este enfoque de justicia. La propiedad social de la infraestructura energética, la participación democrática en su gestión y el reparto colectivo de beneficios son elementos que permiten revertir las desigualdades históricas, fortalecer la autonomía territorial y garantizar que las comunidades estén en el centro de la transformación energética y de la acción climática en el país.

2.2. Metodología de intervención comunitaria

La metodología desarrollada por IDEA e ICM para estructurar proyectos de generación distribuida comunitaria es el resultado de la sistematización de aprendizajes obtenidos de diversos proyectos energéticos implementados en territorio. Surge como una respuesta técnica, social, económica y política al reto de construir modelos energéticos que sean justos, viables y adaptables, en un contexto donde la normatividad, los mecanismos de inclusión y las condiciones institucionales están en evolución constante.

Se trata de un modelo innovador que parte del reconocimiento de que la transformación energética debe construirse desde abajo, considerando la diversidad de contextos, actores y capacidades locales. Desde esta perspectiva, se busca traducir los principios de la transición energética justa en esquemas operativos concretos, diseñados mediante procesos participativos y estructurados que permitan responder a las realidades de las comunidades. En lugar de imponer fórmulas únicas, esta metodología se adapta a cada territorio y contexto mediante cinco ejes complementarios que articulan los componentes técnicos, económicos y sociales de cada proyecto:

1. **Diagnóstico socioterritorial participativo:** es un proceso que integra análisis técnicos y metodologías participativas, articulando saberes locales con criterios de planificación territorial, este diagnóstico se convierte en una herramienta clave para orientar proyectos de generación distribuida comunitaria hacia soluciones socialmente





pertinentes, técnicamente viables y sostenibles en el tiempo (Concha, Sánchez & Rojas, 2022).

2. **Diseño de modelos adaptativos:** Se desarrollan estructuras organizativas y esquemas financieros ajustados a las capacidades, necesidades y aspiraciones de cada comunidad, tales como cooperativas, comités ejidales o fideicomisos comunitarios. Estos modelos incorporan herramientas de evaluación económica, modelos de gobernanza y criterios de sostenibilidad financiera de largo plazo.
3. **Contraprestación justa:** Se evalúan alternativas para valorizar la energía generada, en coherencia con los marcos regulatorios vigentes y principios de equidad. Se definen vehículos y modelos de contraprestación posibles como la venta total a la red, medición neta comunitaria o facturación virtual, priorizando siempre que los ingresos o ahorros se distribuyan de manera colectiva, transparente y solidaria.
4. **Vinculación institucional:** Se establece un diálogo técnico-político con gobiernos subnacionales, organismos públicos y aliados estratégicos para facilitar la implementación, armonizar normativas locales y escalar las experiencias exitosas. Destaca la conformación del Grupo de Trabajo Subnacional para la Transición Energética Justa, que ha reunido a representantes de más de 25 estados de la República que se han interesado en capacitarse, informarse, compartir experiencias y buenas prácticas, con el fin de adaptar estas iniciativas en sus contextos locales de trabajo.
5. **Fortalecimiento de capacidades comunitarias y técnicas:** Se impulsa la formación de liderazgos comunitarios y personal técnico local en operación de sistemas fotovoltaicos, mantenimiento, gestión participativa y enfoques de género e inclusión, garantizando la sostenibilidad a largo plazo de las iniciativas y reforzando la autonomía energética de las comunidades.

La metodología presentada se estructura en cinco ejes complementarios que integran los componentes técnicos, sociales, financieros y normativos de cada proyecto. La Figura 1 sintetiza de manera práctica los pasos metodológicos, los actores involucrados y los resultados esperados en cada etapa, facilitando su comprensión y potencial replicación en distintos territorios.

TABLA 1. Metodología para estructurar proyectos de GDC

Eje Metodológico	Acciones Clave	Actores involucrados	Resultados esperados
1. Diagnóstico socioterritorial participativo	Levantamiento técnico-social; identificación de usos y prioridades energéticas; sistematización de información territorial	Comunidad; equipo técnico; autoridades locales	Pertinencia social del proyecto; identificación de barreras y oportunidades
2. Diseño de modelos adaptativos	Estructuras operativas; evaluación económico-financiera; definición de responsabilidades y reglas	Comunidad; asesores técnicos-financieros	Modelo sostenible; claridad operativa; viabilidad económica
3. Contraprestación Justa	Evaluación de modalidades; reglas colectivas; transparencia en distribución de beneficios.	Comunidad; CFE; instancias regulatorias	Beneficios equitativos; claridad de ingresos y ahorros
4. Vinculación Institucional	Coordinación con gobiernos subnacionales; compatibilidad normativa; intercambio de experiencias.	Gobiernos locales; instituciones técnicas; comunidad.	Condiciones habilitantes; escalabilidad territorial; incidencia normativa
5. Fortalecimiento de capacidades.	Capacitación en operación y mantenimiento; formación en gobernanza; seguimiento y asistencia técnica.	Comunidad; técnicos locales	Autonomía energética; sostenibilidad operativa; apropiación comunitaria

En conjunto, esta metodología no sólo hace posible la estructuración y desarrollo técnico de los proyectos, sino que traza una ruta para que los beneficios de la transición energética se distribuyan de forma equitativa y para que las comunidades ejerzan un rol activo, deliberativo y soberano en la transformación de su realidad energética.

3. Casos de estudio

Los modelos de generación distribuida comunitaria estructurados por IDEA e ICM han sido implementados en





distintos contextos locales de México, lo que ha permitido comprobar su viabilidad técnica, económica y social, así como identificar las diferentes barreras para su expansión. A continuación, se presentan dos experiencias contrastantes que ejemplifican cómo estos esquemas pueden adaptarse a diferentes condiciones territoriales.

3.1. Ejido Solar

Ejido Solar constituye un caso emblemático en la estructuración de proyectos comunitarios de generación distribuida en México. Más allá de su componente técnico, el valor del proyecto reside en la ruta metodológica construida con la comunidad como actor central, en un marco normativo todavía limitado para figuras colectivas de generación eléctrica.

La intervención inició con un proceso de diagnóstico socioterritorial participativo, en el que se identificaron las condiciones técnicas del Ejido, su estructura organizativa y su interés en avanzar hacia un modelo de autonomía energética. A partir de este punto, ICM acompañó la definición de un modelo de gobernanza tomando como base la estructura organizativa ejidal, lo que implicó adaptar herramientas legales, financieras y operativas a las capacidades locales existentes.

Uno de los principales retos fue la ausencia de un marco normativo para la facturación colectiva o la medición virtual compartida. Para sortear esta barrera, se diseñó un esquema operativo intermedio que permitiera vincular el sistema fotovoltaico central con los consumos individuales de cada familia, manteniendo una lógica comunitaria en la gestión. Este proceso dio lugar al Comité de Energía del Ejido, como una estructura organizativa interna que asumió responsabilidades de operación, administración y coordinación con actores externos.

Durante la implementación, se trabajó intensamente en la formación técnica, legal y financiera de los integrantes de la comunidad. Este proceso incluyó actividades de alfabetización energética, simulaciones de consumo y ejercicios para decidir de manera colectiva el reparto de beneficios. Al mismo tiempo, el financiamiento se diseñó como un esquema mixto, que combinó recursos públicos, aportaciones comunitarias y gestión institucional.

ICM y parte del equipo que hoy integra IDEA facilitó el diseño de la arquitectura jurídica y financiera del modelo, así como la incidencia política en los distintos

niveles de gobierno para evidenciar la necesidad de cambios regulatorios. En este contexto, Ejido Solar se ha convertido en un caso clave para impulsar la incorporación del concepto de generación distribuida comunitaria en el marco normativo actual, con el objetivo de lograr su reconocimiento formal como figura específica dentro de la regulación eléctrica nacional.

Ejido Solar se ha concebido como un modelo innovador orientado a impulsar proyectos de generación distribuida comunitaria. En su diseño técnico de referencia, el sistema alcanza una potencia instalada aproximada de 495.72 kWp, distribuida sobre una superficie cercana a 92 m por 71 m (aproximadamente 6 500 m²). El costo total de instalación se estima en 10.25 millones de pesos, equivalente a MXN \$20,670/kW, mientras que los costos anuales de operación y mantenimiento ascienden a \$312,201 pesos, es decir, aproximadamente MXN \$630/kW-año. Estos indicadores permiten dimensionar de manera práctica los recursos físicos y financieros necesarios para su replicación territorial.

Si bien se han presentado grandes retos para su implementación, se han desarrollado estudios integrales de carácter técnico, financiero y social en estados como Sonora, Guanajuato, Jalisco y Quintana Roo, que han permitido validar su viabilidad y potencial de replicabilidad [5]. Estos ejercicios muestran que, con el acompañamiento adecuado y la puesta de recursos al servicio de las comunidades, es posible fortalecer capacidades locales, liderazgos y cohesión social, abriendo la ruta para que las comunidades encabezen proyectos que contribuyan a una transición energética justa desde sus propios territorios y estructuras organizativas.

3.2. Programa Hogares Solares

El concepto de Hogares Solares surge como una propuesta innovadora para transformar el subsidio eléctrico residencial en inversión productiva de generación distribuida. Su diseño plantea que los hogares con tarifa doméstica subsidiada instalen techos solares fotovoltaicos interconectados, bajo un esquema en el cual el pago mensual por arrendamiento del sistema a la CFE se sitúe entre 15 y 20 % por debajo del gasto eléctrico base del usuario. A cambio, los usuarios ceden el 100 % de los excedentes generados a la CFE, lo que permite reducir el costo del suministro básico, liberar recursos fiscales y crear un fondo revolvente para ampliar la cobertura del programa.





Los estudios de viabilidad realizados por ICM muestran que, mediante la creación de un mecanismo revolvente que considera un universo de 24 millones de usuarios, podría instalarse un total de 28.7 GW de capacidad solar, generando 45.4 TWh/año, evitando 22 MtCO₂e/año y produciendo un valor presente neto superior a 159 mil millones de pesos en un horizonte de 20 años, además de más de 200 000 empleos directos e indirectos y ahorros hídricos equivalentes a lo consumido por 1.1 millones de personas [5]. El modelo financiero contempla que, durante los primeros seis años, el fondo revolvente recibe apoyo inicial mediante crédito; del año 8 al 15, el subsidio evitado acumulado alimenta el fondo, permitiendo sostener el programa durante al menos 15 años; y a partir del año 16, la eliminación del subsidio otorgado por la CFE libera recursos fiscales que pueden ser destinados a otros programas sociales.

El mecanismo se concibe como un nuevo modelo de negocio para la CFE, capaz de sustituir gradualmente los subsidios regresivos por inversiones en energía limpia distribuida. Además de reducir emisiones y costos en la cadena de valor del suministro eléctrico, fortalece la seguridad energética y la autonomía de los hogares, alineándose con los compromisos de México en el Acuerdo de París y con los principios de la transición energética justa. Su planteamiento encuentra resonancia en programas como Techos Solares para el Bienestar, que, aunque no contempla de manera directa la reducción del subsidio eléctrico, comparte la lógica de generar beneficios sociales y ambientales a partir de esquemas innovadores de generación distribuida, mostrando que existen caminos diversos pero complementarios para avanzar en la transición energética desde los territorios.

Si bien la metodología aplicada ha permitido estructurar modelos viables de generación distribuida comunitaria, el proceso ha revelado barreras internas recurrentes. Entre ellas destacan el desgaste organizativo y la rotación de liderazgos en comités ejidales, la dificultad para acceder y sistematizar información técnica relevante, asimetrías en capacidades administrativas y financieras, así como tensiones interpersonales derivadas de niveles diferenciados de involucramiento. La metodología no elimina estas dinámicas, pero las aborda a través de acuerdos explícitos, roles formalizados, acompañamiento técnico continuo y mecanismos de transparencia, contribuyendo a procesar diferencias sin reproducir desigualdades ni comprometer la gobernanza del proyecto.

4. ELEMENTOS CLAVE PARA EL IMPULSO DE MODELOS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA COMUNITARIA.

Las experiencias impulsadas por ICM e IDEA han demostrado que los modelos de generación distribuida comunitaria son una vía clave, efectiva y viable para avanzar hacia una transición energética justa desde lo local. Su implementación en distintos territorios ha permitido identificar elementos estratégicos que ayudan a sortear barreras estructurales y habilitar condiciones necesarias para su escalabilidad.

Uno de los principales aprendizajes es que los modelos financieros deben ir más allá del subsidio directo y orientarse a mecanismos que generen valor a largo plazo. En este sentido, Hogares Solares muestra cómo es posible convertir un gasto público recurrente en inversión en infraestructura renovable, al mismo tiempo que se ofrecen beneficios tangibles a los usuarios, fortaleciendo la viabilidad y la justicia de la transición energética.

Desde el punto de vista normativo, estas experiencias han permitido construir una propuesta concreta de reconocimiento legal de la generación distribuida comunitaria, aportando insumos técnicos y de diseño institucional que fortalecen la regulación y favorecen modelos más inclusivos y participativos.

A nivel comunitario, se ha comprobado la eficacia de una estrategia basada en el acompañamiento técnico, la formación local y la gobernanza participativa. Este enfoque permite que las comunidades asuman un papel activo en la planificación, operación, mantenimiento y seguimiento de sus sistemas fotovoltaicos y de los beneficios que generan, contribuyendo también a la transparencia y rendición de cuentas en el uso de los recursos públicos.

En conjunto, estas lecciones muestran que los modelos de generación distribuida comunitaria pueden ser un pilar de un nuevo pacto energético en México, donde la acción local impulse cambios estructurales y la energía se convierta en una herramienta de transformación social. Más que una alternativa tecnológica, es una estrategia para redefinir quién decide, quién se beneficia y cómo se construye un futuro energético justo y sostenible para las próximas generaciones.





5. CONCLUSIONES

Las experiencias desarrolladas por ICM e IDEA confirman que los modelos de generación distribuida comunitaria representan una vía concreta y viable para avanzar hacia una transición energética más justa, inclusiva y sustentable en México. Su implementación ha sido posible gracias al trabajo sostenido de actores en el territorio, instituciones técnicas, autoridades locales, agencias de cooperación internacional y organizaciones aliadas de la sociedad civil, que han articulado diagnósticos socioterritoriales, diseño de modelos financieros progresivos, estructuración normativa, modelos de gobernanza y estrategias de fortalecimiento de capacidades para la participación comunitaria.

Los resultados evidencian que estos esquemas pueden contribuir simultáneamente a múltiples objetivos como: reducir la pobreza energética, mejorar la resiliencia de los hogares frente al cambio climático, descentralizar la generación eléctrica y fomentar la apropiación social de la energía, fortalecer las estructuras de organización y cohesión comunitaria, fomentar la transparencia y la rendición de cuentas, entre otros. En el caso de Ejido Solar, se desarrolló un modelo replicable para zonas rurales con estructura comunal; en el caso de Hogares Solares, se consolidó un programa piloto con respaldo estatal que vincula subsidios energéticos con la adquisición de tecnologías limpias por parte de los hogares.

No obstante, la expansión de estos modelos requiere superar barreras clave, como la falta de reconocimiento normativo explícito, las limitaciones de capacidades técnicas en algunos territorios y la necesidad de contar con instrumentos financieros adaptados a las realidades económicas locales.

En función de lo anterior, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Reconocimiento normativo de la figura de generación de energía comunitaria en las Disposiciones Técnicas aplicables, como paso fundamental para habilitar su desarrollo a escala nacional.
- Diseño de esquemas financieros mixtos que articulen subsidios públicos, financiamiento local y mecanismos de recuperación de inversión, manteniendo un enfoque progresivo en función del nivel de consumo y la vulnerabilidad energética.

- Fomento de capacidades locales mediante procesos de formación, asistencia técnica y acompañamiento continuo que aseguren la operación, mantenimiento y apropiación social de los sistemas.
- Inclusión de criterios de justicia energética en la planeación energética nacional, reconociendo los derechos, contextos y aportes de las comunidades en el proceso de descarbonización del país.

En suma, los modelos aquí presentados no son únicamente soluciones técnicas; sino expresiones de innovación social y energética construida desde abajo, que desafían las lógicas tradicionales del sector y que abren la posibilidad de imaginar un futuro en el que la energía sea un bien común, gestionado con equidad, corresponsabilidad y visión de largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de los gobiernos subnacionales de Sonora, Guanajuato, Jalisco, Quintana Roo y Campeche por facilitar espacios de diálogo y cooperación en torno a los modelos de generación distribuida comunitaria. Asimismo, se reconoce a las comunidades locales que participaron en los procesos de diagnóstico socioterritorial participativo, y al equipo de trabajo de IDEA e ICM por su esfuerzo en la elaboración técnica y metodológica que dio sustento a este artículo.

REFERENCIAS Y NOTAS DE PIE DE PÁGINA

- [1]. Iniciativa Climática de México, “¿Cómo entendemos la Transición Energética Justa?”, en *Iniciativa Climática de México*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iniciativaclimatica.org/como-entendemos-la-transicion-energetica-justa-2/>
- [2]. Iniciativa Climática de México, “Transición energética justa en México”, en *Iniciativa Climática de México*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iniciativaclimatica.org/transicion-energetica-justa-en-mexico/>
- [3]. Iniciativa Climática de México, *Playbook Ejido Solar. Diseño e implementación de modelos de energía comunitaria*, México, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iniciativaclimatica.org/wp->





- [content/uploads/2023/04/PlaybookEjidoSolar_Final_ConAnexos.pdf](#)
- [4]. C. M. Concha, G. I. Sánchez, y C. A. Rojas, “Diagnóstico socio territorial participativo: una estrategia que articula las necesidades de la sociedad con la formación universitaria,” *Formación Universitaria*, vol. 15, no. 6, pp. 49–58, 2022. doi: 10.4067/S0718-50062022000600049.
- [5]. D. Chacón, “Financiamiento de Generación Distribuida”, Green Finance LAC, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.greenfinancelac.org/wp-content/uploads/2019/12/Financiamiento-De-Generaci%C3%B3n-Distribuida-%E2%80%93-Daniel-Chacon.pdf>
- [6]. Iniciativa Climática de México, *Hogares Solares: Financiamiento de generación distribuida*, México, 2019. Presentación técnica. [En línea]. Disponible en: https://www.iniciativaclimatica.org/wp-content/uploads/2021/09/COP26-T8_Generacio%CC%81nEle%CC%81ctricidad.pdf



Instituto de
Desarrollo
Energía y
Ambiente

El Instituto de Desarrollo, Energía y Ambiente (IDEA), fue fundado en 2024 como un centro de pensamiento y acción, independiente, apartidista y sin fines de lucro, que impulsa soluciones viables y basadas en la mejor ciencia disponible para alcanzar una transición energética justa y promover una prosperidad sostenible que integre el bienestar de las personas, las comunidades y los ecosistemas.

IDEA nace del equipo de Energía de la Iniciativa Climática de México (ICM), que desde hace más de 10 años recanaliza fondos internacionales, proporciona asistencia técnica, elabora recomendaciones de política pública y fomenta la participación de diversos actores para descarbonizar el sector energético de México. IDEA representa la evolución de ese camino para ampliar nuestro impacto como centro de pensamiento y acción, con una visión regional y de largo plazo.





Alternativas de desarrollo energético de Baja California Sur

RICARDO R. CRUZ SALINAS, LUISA SIERRA BROZON, M. PILAR VALENCIA MONTES,
JOSÉ D. ÁLVAREZ GUERRERO AND YOTZELIN SALDAÑA BELTRAN

Instituto de Desarrollo Energía y Ambiente, Benito Juárez, CDMX, 03100, México

Autor de Correspondencia: R. R. Cruz Salinas (e-mail: ricardo.cruz@ideathinktank.org.mx).

RESUMEN El estado de Baja California Sur (BCS) enfrenta una situación energética singular caracterizada por desafíos técnicos, sociales, ambientales y políticos. La pobreza energética afecta a una parte significativa de su población, mientras que otra enfrenta interrupciones frecuentes en el suministro eléctrico. Paralelamente, el modelo de desarrollo económico del estado se ha basado en el turismo y el crecimiento inmobiliario lo cual mantiene una constante exigencia para satisfacer la demanda energética, sin considerar plenamente los impactos ambientales acumulativos, especialmente en un contexto de crisis hídrica severa y presión sobre áreas naturales protegidas.

Este trabajo propone una estrategia integral para el desarrollo energético de BCS, fundamentada en una transición energética justa, con énfasis en fuentes renovables y esquemas de generación descentralizada.

La metodología empleada incluye un modelo de optimización para la expansión de capacidad de generación y simulaciones de despacho eléctrico, complementado con un análisis del potencial de electrificación mediante renovables en comunidades aisladas. Los resultados evidencian que un enfoque descentralizado y sustentado en energías limpias no solo es técnica y económicamente viable, sino que también puede maximizar beneficios sociales y ambientales, superando las limitaciones del modelo centralizado basado en combustibles fósiles.

PALABRAS CLAVE: Transición Energética Justa, Energías renovables, Baja California Sur, pobreza energética, justicia energética, planeación energética.

1. INTRODUCCIÓN

El estado de Baja California Sur (BCS) presenta una situación energética singular en el contexto nacional, derivada de su condición geográfica aislada y su estructura socioeconómica. A diferencia de la mayoría de las entidades federativas, BCS no está interconectado al sistema eléctrico que abarca el país, sino que opera mediante dos sistemas eléctricos independientes: el Sistema Interconectado de Baja California Sur (SIBCS) y el Sistema Interconectado de Mulegé (SIMUL). Esta característica, sumada a la dispersión territorial, baja densidad poblacional y la concentración de la demanda en los municipios de Los Cabos y La Paz, genera retos significativos en términos de confiabilidad, costos y sostenibilidad del suministro eléctrico.

De acuerdo con la información tratada en este estudio, a partir de datos de la Secretaría de Energía [1], más del 85% de la generación eléctrica en BCS proviene de combustibles fósiles, principalmente mediante centrales de combustión interna y turbogás, que utilizan diésel y combustóleo, lo que se traduce en altos costos marginales locales, hasta seis veces superiores al promedio nacional, y en una elevada vulnerabilidad ante la volatilidad de precios de los combustibles. A ello se suma el crecimiento acelerado de la demanda eléctrica, impulsado por el dinamismo del sector turístico y el desarrollo inmobiliario que ha registrado tasas anuales superiores al 4% en la última década [2].

En paralelo, persisten desafíos sociales y ambientales: aunque el acceso a la electricidad supera el 98% [2], existen comunidades rurales aisladas sin conexión a la red, y más del 13% de los hogares carece de condiciones adecuadas de confort térmico [3], lo que refleja una pobreza energética relativa en un contexto de clima extremo.

Frente a este panorama, la planeación energética de BCS requiere estrategias que garanticen un suministro confiable,



asequible y ambientalmente sostenible, alineadas con los objetivos nacionales de transición energética y reducción de emisiones. Este artículo presenta un análisis comparativo entre el escenario oficial de expansión [4], que propone la instalación de una central de combustión interna, y un escenario alternativo que prioriza la incorporación de energías renovables, almacenamiento y generación distribuida, evaluando su viabilidad técnica, económica y ambiental mediante modelos de optimización y simulación de despacho horario.

2. CONTEXTO ENERGÉTICO Y SOCIOECONÓMICO DE BCS

Baja California Sur (BCS) es una entidad con características geográficas y demográficas que condicionan su desarrollo energético. El estado está conformado por cinco municipios: Los Cabos, La Paz, Comondú, Loreto y Mulegé, con una población total cercana a 800 mil habitantes. La distribución poblacional es altamente desigual: Los Cabos y La Paz concentran más del 80% de la población y del consumo eléctrico, mientras que los municipios del norte presentan baja densidad y crecimiento demográfico reducido.

La economía estatal depende en gran medida del sector terciario, particularmente del turismo, que representa casi el 80% del PIB local. Esta estructura económica impulsa una demanda eléctrica creciente, con tasas anuales superiores al 4% en la última década, especialmente en Los Cabos. El turismo, además, concentra el consumo en grandes hoteles, servicios y comercios, lo que incrementa la presión sobre la infraestructura eléctrica.

Aunque el acceso a la electricidad supera el 98%, persisten brechas de calidad y confort energético: más del 13% de los hogares carece de condiciones adecuadas de climatización y el 8.6% no dispone de refrigeración eficiente, lo que refleja una pobreza energética relativa en un contexto de clima extremo [3]. Adicionalmente, 63 comunidades rurales permanecen sin conexión a la red, afectando a más de 4,400 personAS.

2.1. INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA Y RETOS OPERATIVOS

BCS opera mediante dos sistemas eléctricos aislados: el Sistema Interconectado de Baja California Sur (SIBCS), que abastece a Los Cabos, La Paz, Loreto y Comondú, y el Sistema Interconectado de Mulegé (SIMUL), que cubre el norte del estado. Esta condición de aislamiento impide el intercambio de energía con el Sistema Interconectado Nacional, lo que incrementa la vulnerabilidad ante contingencias y eleva los costos de generación.

La matriz eléctrica está dominada por fuentes fósiles (85%), principalmente turbogás y combustión interna, con una participación marginal de renovables (solar 10%, eólica 4%, geotermia 1%). Esta dependencia se traduce en precios marginales locales hasta seis veces superiores al promedio nacional y en emisiones significativas de gases de efecto invernadero. Además, el sistema enfrenta márgenes de reserva insuficientes, saturación de líneas y degradación de centrales, lo que ocasionó más de 20 cortes de carga en 2023 [5].

La generación distribuida (GD) ha tenido un crecimiento sostenido, sin embargo, este esquema se enfrenta a restricciones técnicas derivadas de los límites de alojamientos en las redes de distribución, establecidos por el CENACE para garantizar la estabilidad del sistema. Entre 2020 y 2023, el límite de alojamiento, de 18 GW, había sido alcanzado por lo que no fue posible interconectar nuevos sistemas de GD. En 2024, CENACE incrementó el límite, lo que ha permitido que el crecimiento de la GD se reanude.

3. METODOLOGÍA

El análisis para determinar rutas de expansión del sistema eléctrico de BCS se desarrolló en las tres etapas principales que se describen a continuación.

3.1. PROCESAMIENTO Y PROYECCIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA.

Se utilizaron los datos horarios de demanda por retiro publicados por el CENACE [6] [7] para las zonas de carga del estado de Baja California Sur. Tras un proceso de depuración y validación, las zonas fueron agrupadas en las cuatro regiones de transmisión de CENACE: Los Cabos, La Paz, Villa Constitución y Mulegé.

Con esta información se realizó una proyección de la demanda horaria para el horizonte 2025-2030 mediante un modelo ARIMA, calibrado con series históricas y ajustado para capturar la estacionalidad y las tendencias de crecimiento observadas en cada región.

Por otro lado, se obtuvo la base de datos de la Comisión Nacional de Energía (CNE) que contiene los registros de todas las centrales de GD. A partir de esta información se estimaron dos trayectorias de crecimiento:

- Escenario Línea Base (LB): proyección basada en el comportamiento histórico, modelada mediante un ajuste exponencial suavizado.
- Escenario Alternativo (EA): crecimiento alineado con la Ruta de Emisiones Netas Cero Iniciativa Climática de México [8]. [8]





Con estas proyecciones se estimaron los valores horarios de generación eléctrica de GD utilizando las curvas de disponibilidad solar del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), integradas en la plataforma de modelación que se describe en la siguiente sección. Esta generación se restó a las proyecciones de demanda, obteniendo así la demanda neta que el modelo debía satisfacer con generación centralizada.

3.2. MODELACIÓN DE EXPANSIÓN Y OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Para la evaluación de escenarios se empleó la plataforma SAInt (Scenario Analysis Interface), una herramienta especializada en la optimización de expansión de capacidad y simulación de despacho horario. SAInt permite integrar características técnicas y económicas de las centrales eléctricas, restricciones operativas y parámetros de confiabilidad, así como representar la dinámica horaria de generación y demanda.

En el modelo se incorporaron:

- Todas las centrales eléctricas existentes en BCS, con sus características técnicas (capacidad, tecnología, eficiencia, costos variables y restricciones operativas). Es importante señalar que los parámetros técnicos de las centrales se ajustaron de acuerdo con la información del estado que guardan según SENER [5]. Un listado resumido se presenta en la Tabla 1.

TABLA 1. Listado de centrales eléctricas en BCS

Tecnología	Nombre	Combustible	Capacidad instalada
Combustión interna	Agustín Olachea Avilés	Diésel	105 MW
Turbogás	C. Turbogás Constitution	Diésel	33 MW
Combustión interna	C. Baja California Sur	Diésel	46 MW
Turbogás	C. Baja California Sur	Diésel	112 MW
Termoeléctrica	Punta Prieta II	Combustóleo	76 MW
Turbogás	Punta Prieta II	Diésel	43 MW
Eólica	Coromuel	Viento	50.4 MW
Fotovoltaica	Aura	Sol	55 MW
Turbogás	Amaunet	Gas natural	159 MW
Turbogás	Los Cabos	Diésel	217 MW
Combustión interna	Santa Rosalía	Combustóleo	17 MW

Turbogás	Santa Rosalía	Diésel	10 MW
Fotovoltaica	Santa Rosalía	Sol	1 MW
Geotérmica	Tres Virgenes	Vapor geotérmico	5 MW
Turbogás	Vizcaino	Diésel	14 MW

- **Opciones tecnológicas para expansión**, incluyendo tecnologías fósiles y renovables (solar fotovoltaica, eólica, geotermia) y sistemas de almacenamiento de energía.
- **Proyecciones de demanda neta horaria** para cada región de transmisión.

3.3 CONSTRUCCIÓN Y COMPARACIÓN DE ESCENARIOS

Los escenarios comparativos se construyeron de acuerdo con lo siguiente:

- **Escenario Línea Base (CCI):** considera únicamente la adición de una central de combustión interna en Los Cabos, con las características técnicas y costos reportados en los planes oficiales del gobierno federal. No se permite al modelo adicionar ninguna otra tecnología de generación.
- **Escenario Alternativo (ER):** permite al modelo seleccionar libremente tecnologías renovables y almacenamiento para satisfacer la demanda proyectada, bajo criterios de minimización de costos y cumplimiento de restricciones técnicas.

4. RESULTADOS

Los resultados del análisis se presentan en cuatro dimensiones: (i) evolución de la capacidad instalada, (ii) composición de la generación eléctrica y (iii) evaluación comparativa de costos y emisiones entre los escenarios.

4.1. EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA

En el Escenario Línea Base, la capacidad instalada en 2030 se mantiene dominada por tecnologías fósiles. La adición de la central de combustión interna (CCI) de 240 MW en Los Cabos eleva la capacidad total de esta tecnología a 581 MW, mientras que las centrales de turbogás y termoeléctricas permanecen sin cambios significativos. La generación renovable centralizada (solar, eólica y geotermia) conserva una participación minoritaria, sumando el 12% y la generación distribuida crece de forma tendencial para solo llegar a 34 MW.





Por el contrario, en el Escenario Alternativo, la estructura de la matriz se transforma de manera sustancial. Aunque se mantiene la capacidad existente de turbogás y combustión interna, se incorporan nuevas plantas solares, eólicas y geotérmicas, junto con sistemas de almacenamiento de tal forma que la participación de las energías renovables llega al 36.6%. Por su parte, la generación distribuida llega a 48 MW. Este escenario permite la salida de operación de la central termoeléctrica de Punta Prieta (119 MW) en 2030, lo que representa un hito en la reducción de generación con combustóleo.

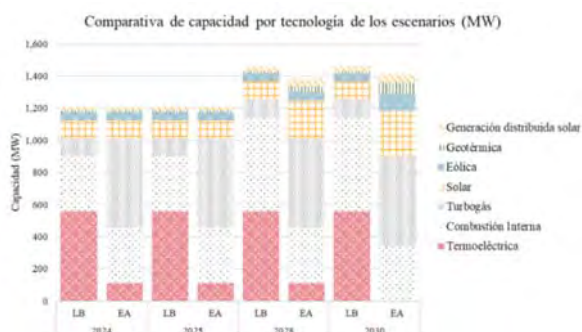


FIGURA 1. Comparativa de capacidad por tecnología de los escenarios (MW).

4.2 GENERACIÓN ELÉCTRICA Y PARTICIPACIÓN RENOVABLE

En el escenario base, la generación fósil se incrementa de 86% en 2025 a 88% en 2030, con un aumento significativo en la participación de la CCI. Las renovables se mantienen en niveles marginales (12%).

En contraste, el escenario alternativo eleva la participación renovable de 15% en 2025 a 37% en 2030, gracias a la expansión solar, eólica y geotérmica, complementadas con almacenamiento.

Esta diversificación puede calcularse mediante el índice Herfindahl-Hirschman, que se encuentra entre 0 y 1 y que mientras más cercano a 0 indicará una mayor diversificación. Mientras más diversificada esté la matriz de generación, el sistema cuenta con una mayor resiliencia.

Como se puede observar en la tabla 2, mientras que en la línea base la diversificación se reduce en 2030 en comparación con el año base, en el escenario alternativo la diversificación se incrementa sustancialmente.

TABLA 2. Comparativa de diversificación de la matriz eléctrica.

Escenario	Año	HHI
Línea Base	2024	0.324
Alternativas	2030	0.324

Línea Base	2024	0.424
Alternativas	2030	0.247

4.3 COSTOS Y EMISIONES

El análisis económico muestra que el portafolio de adiciones de capacidad del escenario alternativo serían un 72% más económico que la línea base (la cual consiste en solo la central de combustión interna), con un costo nivelado de la energía (LCOE) de 83.9 USD/MWh, frente a 134.2 USD/MWh del escenario LB. Esta diferencia se explica por la reducción en costos de combustible y los menores costos de inversión.

En términos ambientales, el escenario alternativo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en 15% hacia 2030, mientras que la línea base incrementa las emisiones debido a la mayor generación con combustibles fósiles.

TABLA 3. Características y LCOE de la línea base

Escenario de Línea Base	
Central:	CCI Los Cabos
Año de entrada en operación	2028
Capacidad (MW):	240
Vida útil (años):	25
Costo de inversión (MUSD):	370
Factor de planta (resultante del modelo):	83%
Generación anual (GWh):	1,732
Consumo de gas natura (PJ):	17
PRrecio del gas natural (USD/GJ)	8.56
LCOE (USD/MWh):	134.18

TABLA 4. Características y LCOE del escenario alternativo

Escenario Alternativo			
Central:	PV + SAE	SAE no asociado	Geotérmica
Año de entrada en operación	2028	2028	2028
Capacidad (MW):	123 + 37	100	30
Vida útil (años):	25		
Costo de inversión (MUSD):	182	155	138
Factor de planta (resultante del modelo):	32%	16%	60%





Generación anual (GWh):	349	146	147
LCOE (USD/MWh):	58.45	132	96.9

TABLA 4. Características y LCOE del escenario alternativo (continuación)

Escenario Alternativo				
Central:	SAE no asociado	PV + SAE	Eólica + SAE	Geotérmica
Año de entrada en operación:	2030	2030	2030	2030
Capacidad (MW):	71	53 + 16	55	30
Vida útil (años):	25	25	25	25
Costo de inversión (MUSD):	110	78	609	138
Factor de planta (resultante del modelo):	16%	32%	34%	60%
Generación anual (GWh):	104	150	981	147
LCOE (USD/MWh):	114	58.45	80.05	114
LCOE de la cartera (USD/MWh)	83.9			

4.4 FACTIBILIDAD OPERATIVA

La simulación del despacho horario de todo un año muestra sirve para analizar la factibilidad técnica de operación de la matriz de generación eléctrica propuesta para cada escenario.

En este caso, para el escenario ER, se muestra que, en términos de potencia real a nivel de regiones de control, el sistema de BCS puede operar de forma continua y satisfacer en todo momento la demanda con mayores participaciones de energía solar, eólica y geotérmica.

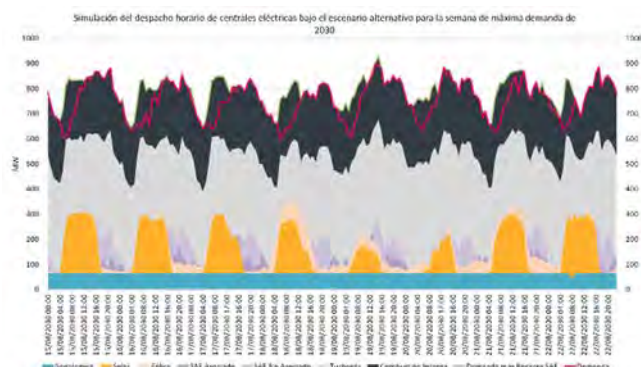


FIGURA 2. Simulación del despacho de la semana de máxima demanda en 2030 en el escenario alternativo.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados en cuanto a costos y emisiones muestran que optar por la integración de centrales de generación basadas en fuentes renovables no solo tiene beneficios ambientales si no que pueden significar una reducción en los costos de generación eléctrica, reportando costos hasta un 35% inferiores al escenario de línea base.

El portafolio de adición de centrales renovables abarca no solo a la región de Los Cabos, si no que abarca a todo el territorio de BCS, mejorando el acceso a energía eléctrica tanto de las grandes urbes como de las regiones con baja densidad poblacional. Esto a su vez puede optimizar las inversiones necesarias en transmisión, reduciendo la necesidad de nuevas líneas y permitiendo que los recursos se destinen a elementos de control, flexibilidad y seguridad.

Además, con esta estrategia se aumenta la diversificación, lo cual permite que los sistemas de BCS sean más resilientes, fortaleciendo a la región frente a la volatilidad de precios de los combustibles fósiles con lo que las tarifas finales pueden reducirse paulatinamente.

La simulación de despacho demuestra que la operación de un sistema con una mayor participación de fuentes de energía variables (solar y eólica) es técnicamente factible. De esta forma se pueden reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, los contaminantes locales y la dependencia a los combustibles fósiles.

Además, es de resaltar que el retiro de la central termoelectrica de Punta Prieta es técnica y económicamente viable. La sustitución de esta planta por generación renovable y almacenamiento no compromete la confiabilidad del sistema, como lo demuestra la simulación horaria, y contribuye a reducir los impactos locales para la población de La Paz.

La transición hacia un portafolio renovable no es solo deseable, sino necesaria. Continuar con la expansión fósil implica mayores costos, riesgos de desabasto y vulnerabilidad ante la volatilidad de combustibles. En cambio, la adopción de un enfoque renovable fortalece la seguridad energética y promueve una transición justa con beneficios sociales y ambientales.

REFERENCIAS

- [1] SENER, «Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2024-2038,» 2024.
- [2] SECTUR (Secretaría de Turismo), «Indicadores turísticos por entidad federativa: Baja California Sur,» DataTur, 2025. [En línea]. Available:





- https://datatur.sectur.gob.mx/ITxEF/ITxEF_BCS.aspx.
[Último acceso: 2025].
- [3] INEGI, «Panorama sociodemográfico de Baja California Sur: Censo de Población y Vivienda 2020,» Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, 2021.
- [4] B. G. Rigoberto García-Ochoa, «Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional,» *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. XVI, n° 51, pp. 289-337, 2016.
- [5] Proyectos México, «“Plan de Fortalecimiento y Expansión del Sistema Eléctrico Nacional: Generación”,» 2025. [En línea]. Available:
https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/plan-de-fortalecimiento-y-expansion-del-sistema-electrico-nacional-generacion/.
- [6] CENACE, «Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transición y las Redes Generales de Distribución que correspondan al Mercado Eléctrico Mayorista 2024-2038,» 2024.
- [7] CENACE, «Sistema de Información del Mercado/Área Pública/Mercado de Energía de Corto Plazo/Valores agregados/Estimación de la Demanda Real,» [En línea]. Available:
<https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/EstimacionDemandaReal.aspx>.
- [8] CENACE, «Precios de Energía y Servicios Conexos MDA,» CENACE (Centro Nacional de Control de Energía), [En línea]. Available:
<https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/PreEnerServConMDA.aspx>. [Último acceso: 2025].
- [9] ICM, «Rutas sectoriales para el escenario nacional emisiones netas cero de México. Una propuesta desde Sociedad Civil (Primera edición),» Iniciativa Climática de México, Ciudad de México, 2023.
- [1] INEGI, «Panorama sociodemográfico de Baja California Sur: Censo de Población y Vivienda 2020,» Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2021.





Estudio exergético comparativo de un sistema de refrigeración simple y uno de doble cascada

SERGIO CASTRO HERNÁNDEZ¹, JUAN MISAEL LEZAMA IBAÑEZ¹, RAÚL LUGO LEYTE¹, HELEN DENISE LUGO MÉNDEZ², ALEJANDRO TORRES ALDACO¹, GUILLERMO BENÍTEZ OLIVARES¹

¹Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco, No. 186, Col. Leyes de Reforma 1era Sección, CDMX, 09310, México.

²Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana, Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga, No. 4871, Colonia Santa Fé, CDMX, 05348, México.

Autor de Correspondencia: Sergio Castro Hernández (e-mail: sch@xanum.uam.mx).

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis comparativo, desde el enfoque exergético, entre un sistema de refrigeración simple por compresión de vapor y un sistema de doble cascada, ambos operando con R134a, con el fin de evaluar su desempeño termodinámico bajo condiciones de operación establecidas. El objetivo principal es determinar la eficiencia exergética y las irreversibilidades internas en cada componente del ciclo (compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador), así como proponer recomendaciones orientadas a mejorar su funcionamiento. Para ello, se desarrolló un modelo termodinámico en estado estacionario, basado en balances de energía y exergía, considerando las propiedades específicas del R134a. Los resultados muestran que la eficiencia exergética disminuye conforme se reduce la temperatura de evaporación, debido principalmente al incremento de las pérdidas exergéticas en la compresión y la expansión. Asimismo, se observa que la adecuada selección de las condiciones de operación contribuye a minimizar las irreversibilidades y a mejorar el desempeño global del ciclo. Este estudio resalta la relevancia del análisis exergético como herramienta para el diseño y la optimización de sistemas de refrigeración con R134a, particularmente en aplicaciones de temperatura media, como la refrigeración comercial y el enfriamiento de procesos. Finalmente, se proponen estrategias orientadas a incrementar la eficiencia exergética

PALABRAS CLAVE: Análisis exergético, Refrigeración en cascada, R134a.

1. INTRODUCCIÓN

La refrigeración constituye un proceso esencial en una amplia gama de aplicaciones industriales, comerciales y domésticas, desempeñando un papel fundamental en la preservación de alimentos, el almacenamiento de productos farmacéuticos, la climatización de espacios y el control térmico de procesos productivos [1]. En particular, en el rango de temperaturas medias y bajas (aproximadamente de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$), los sistemas de refrigeración por compresión de vapor se utilizan de forma generalizada debido a su simplicidad constructiva, fiabilidad y amplia disponibilidad tecnológica [2]. Sin embargo, cuando las condiciones de operación se alejan del punto de diseño, por ejemplo, al trabajar con temperaturas de evaporación más bajas, los sistemas de una sola etapa tienden a presentar una disminución del desempeño energético y un incremento de las irreversibilidades internas, especialmente en los procesos de compresión y expansión [3]. Entre los refrigerantes más empleados en este rango de temperaturas destaca el R134a, debido a su estabilidad termodinámica, buen comportamiento en la transferencia de calor, compatibilidad con diversos lubricantes y amplia disponibilidad comercial [4]. Este fluido ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones de climatización, refrigeración comercial y enfriamiento de procesos industriales. No obstante, el desempeño de un ciclo simple con R134a depende de una adecuada selección de las condiciones de condensación y evaporación, así como del control preciso de la relación de compresión. Desviaciones significativas en estos parámetros pueden incrementar las pérdidas exergéticas y reducir la eficiencia global del sistema.





Cuando se requieren temperaturas de evaporación más bajas, una alternativa técnica eficiente consiste en implementar sistemas de refrigeración en doble cascada. Esta configuración interconecta dos ciclos de compresión de vapor mediante un intercambiador intermedio, permitiendo que cada etapa opere con el refrigerante más adecuado para su respectivo nivel térmico [5].

En tales sistemas, el R134a se emplea comúnmente en el ciclo de alta temperatura, debido a que sus propiedades termodinámicas y de transferencia de calor resultan apropiadas para el rango intermedio de operación. En algunos casos, también puede utilizarse en la etapa de baja temperatura, siempre que las condiciones no exijan alcanzar temperaturas ultrabajas, lo que simplifica el diseño, reduce la cantidad de refrigerantes distintos y facilita las labores de mantenimiento [6]. No obstante, en el marco de los compromisos internacionales derivados de la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, se ha promovido la sustitución progresiva de los hidrofluorocarbonos (HFC) de alto Potencial de Calentamiento Global (GWP), como el R134a, por refrigerantes de nueva generación con bajo o nulo GWP. En los sectores comercial, industrial y residencial, destacan alternativas como el R513A y el R450A, así como las hidrofluoroolefinas (HFOs) R1234yf y R1234ze(E), que ofrecen un desempeño termodinámico comparable con una reducción significativa del impacto ambiental. En este contexto, México ha establecido la Estrategia Nacional de Enfriamiento (ENE), una herramienta de política pública orientada a promover la transición hacia sistemas de refrigeración y aire acondicionado más eficientes y sostenibles. Esta estrategia, alineada con los objetivos de la Enmienda de Kigali, propone acciones para fomentar el uso de refrigerantes alternativos de bajo GWP, mejorar la eficiencia energética y fortalecer las capacidades técnicas del sector. De esta manera, la ENE contribuye directamente a los compromisos nacionales de mitigación del cambio climático, mediante una gestión integral del enfriamiento.

La comparación entre un ciclo simple y un sistema en cascada con R134a no puede realizarse únicamente a partir de la primera ley de la termodinámica, ya que esta solo cuantifica la cantidad de energía intercambiada sin considerar su calidad ni las irreversibilidades internas asociadas. Por ello, el análisis exergético, basado en la segunda ley, resulta esencial para obtener una visión más precisa del aprovechamiento real de la energía. Este enfoque permite cuantificar la exergía, energía útil disponible, y localizar los componentes donde se concentran las mayores

pérdidas, proporcionando criterios valiosos para el rediseño y optimización de sistemas [7].

En este trabajo se desarrolla un modelo termodinámico en estado estacionario que considera los balances de energía y exergía en los principales componentes: compresores, condensadores, evaporadores, válvulas de expansión e intercambiadores intermedios. Cabe destacar que, en los sistemas de compresión de vapor, la selección del tipo de compresor influye directamente en la eficiencia global, el mantenimiento y el costo operativo. Entre los tipos más comunes se encuentran los compresores de émbolo–pistón y los scroll, que difieren notablemente en su diseño, principio de funcionamiento y campo de aplicación. Los compresores de émbolo–pistón se caracterizan por su robustez mecánica, capacidad para manejar amplios rangos de presión y compatibilidad con diversos refrigerantes, incluidos los naturales como el amoníaco. Debido a estas cualidades, son ampliamente utilizados en sistemas industriales y en aplicaciones de baja temperatura; por ello, en este estudio se adopta este tipo de compresor. Asimismo, se comparan dos configuraciones: Un sistema simple de compresión de vapor con R134a y un sistema en doble cascada, en el cual el ciclo de alta temperatura emplea R134a y el ciclo de baja temperatura también puede utilizar R134a en aplicaciones de temperatura media-baja. El análisis permite evaluar la eficiencia exergética, cuantificar las irreversibilidades internas y determinar las condiciones bajo las cuales una u otra configuración resulta más ventajosa. Los resultados muestran que el sistema en cascada con R134a en ambas etapas presenta una mayor eficiencia exergética en condiciones de baja temperatura de evaporación, debido a una mejor adaptación del perfil de temperaturas entre etapas y a una reducción significativa de las pérdidas en compresión y expansión. Sin embargo, el ciclo simple conserva la ventaja de una mayor simplicidad constructiva. En conjunto, los hallazgos de este estudio ofrecen una base técnica sólida para la selección y optimización de sistemas de refrigeración con R134a, orientada a incrementar la eficiencia exergética, reducir las irreversibilidades internas y minimizar el consumo de potencia, especialmente en aplicaciones industriales y comerciales donde la eficiencia energética y la sostenibilidad son factores críticos.



2. METODOLOGÍA

2.1. Casos de estudio

La Figura 1 muestra el diagrama esquemático del sistema de refrigeración simple. El ciclo comienza cuando el refrigerante, en forma de vapor a baja presión y temperatura, entra al compresor (C). Allí, se comprime, lo que incrementa su presión y temperatura, hasta vapor sobrecalentado. Este vapor sobrecalentado pasa al condensador (COND), donde cede calor al ambiente (ya sea aire o agua), y se condensa transformándose en un líquido a alta presión. Posteriormente, el refrigerante atraviesa una válvula de estrangulamiento (VE), donde sufre una disminución brusca de presión y temperatura, generando una mezcla de líquido y vapor a baja presión. Finalmente, esta mezcla entra al evaporador (EVAP), donde el refrigerante absorbe calor del espacio que se desea enfriar y se evapora completamente. El vapor resultante, ahora a baja presión y temperatura, regresa al compresor para repetir el ciclo.

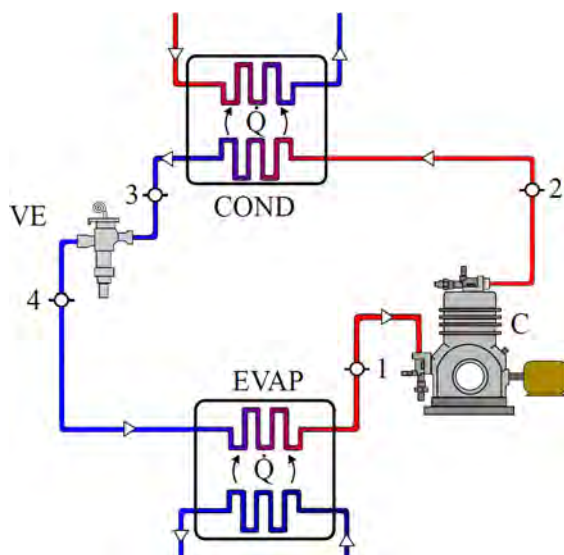


FIGURA 1. Diagrama esquemático del ciclo de refrigeración simple (RS).

La Figura 2 muestra el diagrama esquemático del ciclo de refrigeración en cascada. El funcionamiento del ciclo comienza con el ciclo de alta temperatura, que opera de manera similar al ciclo de compresión simple: el refrigerante se comprime en el compresor de alta presión (CAP), se condensa en el condensador (COND), se expande en la válvula de alta presión (VEAP) y se evapora en el evaporador-condensador (EVAP-COND). Sin embargo, en lugar de que el EVAP-COND absorba calor directamente del espacio a enfriar, este lo hace del condensador del ciclo de

baja temperatura. Por otro lado, el ciclo de baja temperatura puede utilizar el mismo o un refrigerante diferente, capaz de operar eficientemente a temperaturas más bajas. Este refrigerante absorbe calor del espacio o producto que se desea enfriar en su evaporador (EVAP), se comprime en el compresor de baja presión (CBP), y luego cede su calor en el acoplador térmico (EVAP-COND), donde se condensa gracias al enfriamiento proporcionado por el ciclo de alta temperatura; para que finalmente se expanda hasta baja presión en la válvula de baja presión (VEBP). De esta manera, los dos ciclos trabajan de forma conjunta: el ciclo de baja temperatura enfría el espacio deseado, y el ciclo de alta temperatura extrae el calor absorbido por el primero y lo rechaza al ambiente.

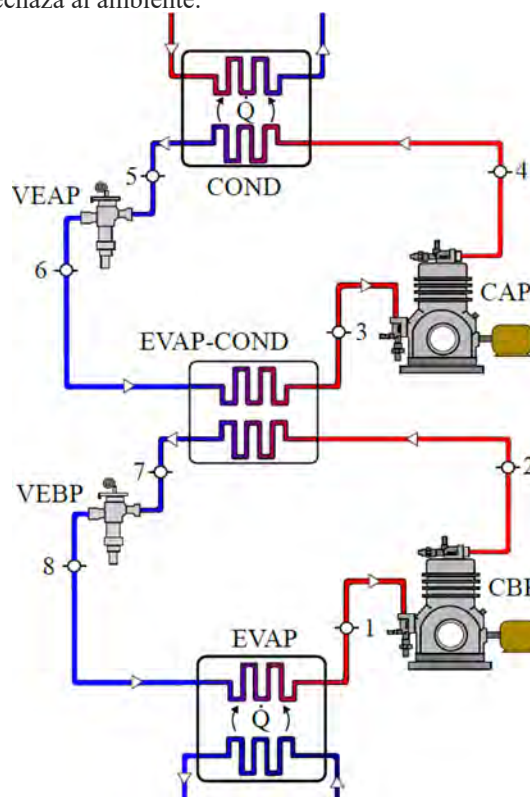


FIGURA 2. Diagrama esquemático del ciclo de refrigeración en cascada (ReC).

Las condiciones de operación de los sistemas son las mostradas en la Tabla 1, que son condiciones que se encuentran en el rango de sistemas de refrigeración comercial de alimentos, cámaras frigoríficas industriales y enfriamiento de procesos industriales medianos.

TABLA 1. Condiciones de operación para los ciclos de refrigeración.

T_{amb} (K)	T_{cond} (K)	T_{evap} (K)	T_{CF} (K)	η_{sic} (-)	η_m (-)	η_e (-)	$\dot{Q}_{cf}$ (kW)
293	298	238	243	0.7	0.8	0.9	100
3							

Las propiedades termodinámicas de cada estado del ciclo simple y el de cascada se determinan a partir de dos parámetros termodinámicos independientes tal y como se muestran en la Tabla 2 y 3.

TABLA 2. Propiedades para el ciclo de refrigeración simple.

Edo	T	P	h	s	x
1	T_{EVAP}	$P(T, x)$	$h(T, x)$	$s(T, x)$	1
2	$T(P, h)$	$P(T_{cond})$	$h_2 = h_1 + \eta_{sit}(h_{2s} - h_1)$	$s(P, h)$	VSC
3	T_{COND}	$P_3 = P_2$	$h(T, x)$	$s(T, x)$	0
4	$T_4 = T_1$	$P_4 = P_1$	$h_3 = h_4$	$s(P, h)$	$x(P, h)$

TABLA 3. Propiedades para el ciclo de refrigeración en cascada.

Edo	T	P	h	s	x
1	T_{EVAP}	$P(T, x)$	$h(T, x)$	$s(T, x)$	1
2	$T(P, h)$	$P_2 = P_{int}$	$h_2 = h_1 + \eta_{sit}(h_{2s} - h_1)$	$s(P, h)$	VSC
3	$T(P, h)$	$P_3 = P_{int}$	$h(P, x)$	$s(P, x)$	1
4	$T(P, h)$	$P(T_{cond})$	$h_4 = h_3 + \eta_{sit}(h_{4s} - h_3)$	$s(P, h)$	VSC
5	T_{COND}	$P_5 = P_4$	$h(T, x)$	$s(T, x)$	0
6	$T_6 = T_3$	$P_6 = P_3$	$h_6 = h_5$	$s(P, h)$	$x(P, h)$
7	$T(P, x)$	$P_7 = P_2$	$h(P, x)$	$s(P, x)$	0
8	$T_8 = T_1$	$P_8 = P_1$	$h_8 = h_7$	$s(P, h)$	$x(P, h)$

2.2. Parámetros energéticos

Para el estudio energético se determina el trabajo de compresión, el calor suministrado al evaporador, el calor disipado en el condensador; esto para el sistema de refrigeración simple y en cascada. Las expresiones se muestran en la Tabla 4

TABLA 4. Parámetros energéticos.

Ciclo	Trabajo de compresión	Calor suministrado	Calor disipado
RS	$h_2 - h_1$	$h_1 - h_4$	$h_3 - h_2$
ReC	$(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)$	$h_1 - h_8$	$h_5 - h_4$

Mientras que, los flujos para cada ciclo se determinan de acuerdo con las siguientes expresiones

$$\text{RS:} \quad \dot{m}_{ref} = \dot{Q}_{cf} / (h_1 - h_4) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ref_1} &= \dot{Q}_{cf} / (h_1 - h_8) \\ \text{ReC:} \quad \dot{m}_{ref_2} &= \dot{m}_{ref_1} [(h_7 - h_2) / (h_6 - h_3)] \end{aligned} \quad (2)$$

Finalmente, para el estudio energético, se determina el coeficiente de operación (COP) para ambos ciclos de la siguiente manera:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{cf}}{\dot{W}_C} \quad (3)$$

donde la potencia suministrada al compresor es el producto del trabajo por el flujo de refrigerante, es decir

$$\text{RS:} \quad \dot{W}_C = \dot{m}_{ref_1} (h_2 - h_1)$$

(4)

$$\text{ReC} \quad \dot{W}_C = \dot{m}_{ref_1} (h_2 - h_1) + \dot{m}_{ref_2} (h_4 - h_3)$$

ReC

(5)

2.3. Parámetros exergéticos

El estudio exergético aplicado a este trabajo sólo contempla el flujo de exergía física, la asociada al trabajo y al calor. La exergía representa el máximo trabajo disponible que se puede obtener de una corriente al llevarla de sus condiciones hasta las condiciones del medio ambiente. El flujo de exergía física se obtiene como:

$$\dot{E}_i^{PH} = \dot{m}_{ref} [(h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0)] \quad (6)$$

Mientras que, los asociados al trabajo y el calor se expresan como:

$$\dot{E}^Q = \dot{m}_{ref} \left(\frac{T_0}{T_r} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\dot{E}^W = \dot{W} \quad (8)$$

El flujo de irreversibilidad se determina a partir del recurso y producto útil de cada elemento; es decir

$$\dot{I} + \dot{R} = \dot{F} - \dot{P} \quad (9)$$

donde $\dot{F}$, $\dot{P}$ y $\dot{R}$ se muestran en las Tablas 5 y 6

TABLA 5. Recurso y producto de los elementos del ciclo de refrigeración simple.

Elemento	$\dot{F}$	$\dot{P}$	$\dot{R}$
C	$\dot{W}_C$	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	---
COND	$\dot{E}_3 - \dot{E}_2$	---	$\dot{E}_{COND}^Q$
VE	$\dot{E}_3$	$\dot{E}_4$	---
EVAP	$\dot{E}_{EVAP}^Q$	$\dot{E}_1 - \dot{E}_4$	---

En el caso del COND, al ser un equipo disipativo, no tiene un producto útil definido.

TABLA 6. Recurso y producto de los elementos del ciclo de refrigeración en cascada.

Elemento	$\dot{F}$	$\dot{P}$	$\dot{R}$
CBP	$\dot{W}_{CBP}$	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	---
CAP	$\dot{W}_{CAP}$	$\dot{E}_4 - \dot{E}_3$	---
COND	$\dot{E}_5 - \dot{E}_4$	---	$\dot{E}_{COND}^Q$
VEAP	$\dot{E}_5$	$\dot{E}_6$	---
EVAP-COND	$\dot{E}_2 - \dot{E}_7$	$\dot{E}_3 - \dot{E}_6$	---
VEBP	$\dot{E}_7$	$\dot{E}_8$	---
EVAP	$\dot{E}_{EVAP}^Q$	$\dot{E}_1 - \dot{E}_8$	---

Finalmente, se determina a la eficiencia exergética, que es la relación entre el producto útil y el recurso suministrado en términos de exergía, es decir:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{Q_{cf}}}{\dot{E}_{W_c}} = COP \left(\frac{T_0}{T_r} - 1 \right) \quad (10)$$

3. RESULTADOS

La Fig. 3 muestra el diagrama Presión-Entalpía del ciclo de refrigeración simple con R134a, que comprende a la compresión (1-2), donde se aumenta la presión y temperatura; condensación (2-3), donde se rechaza calor y disminuye la temperatura; expansión isoentálpica (3-4), donde la presión baja sin cambio de entalpía; y evaporación (4-1), en la que el refrigerante absorbe calor a presión constante, completando el ciclo.

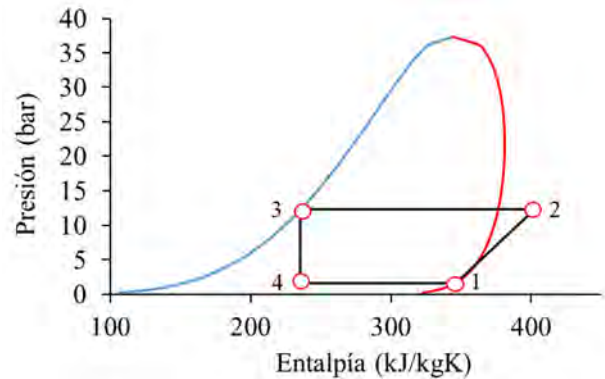


FIGURA 3. Diagrama Presión-Entalpía del ciclo de refrigeración simple.

La Fig. 4 presenta el diagrama exergía-entalpía del mismo ciclo, reflejando cómo la exergía y entalpía varían: la compresión eleva ambas por el trabajo suministrado; en la condensación, la entalpía disminuyen debido a pérdidas y cambio de fase mientras la exergía aumenta; en la expansión, la exergía disminuye mientras la entalpía se mantiene; y en la evaporación, la absorción de calor provoca una disminución de la exergía y aumento de la entalpía, preparando al refrigerante para un nuevo ciclo.

La Fig. 5 presenta el diagrama Presión-Entalpía de un ciclo de refrigeración en cascada con dos etapas que operan con el mismo refrigerante en ambas etapas (R134a). El ciclo superior incluye la compresión (3-4), donde aumentan presión y temperatura; la condensación (4-5), con rechazo de calor y disminución de entalpía; la expansión (5-6), que reduce la presión sin cambio de entalpía; y la evaporación (6-3), donde el refrigerante absorbe calor a presión constante, completando la etapa superior. En la etapa inferior, el refrigerante también pasa por compresión (1-2), condensación (2-7), expansión (7-8) y evaporación (8-1), siguiendo un proceso similar, pero en un rango de presiones distinto que permite la transferencia térmica en el intercambiador de calor entre las dos etapas.

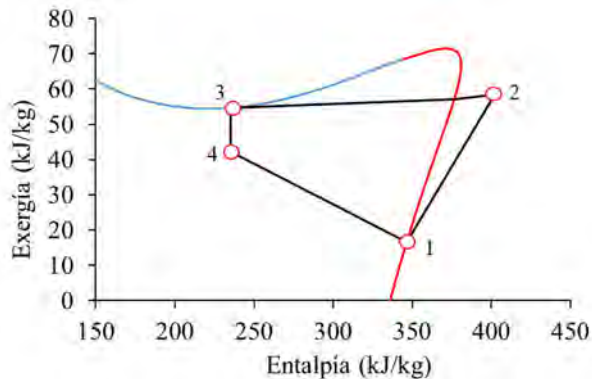


FIGURA 4. Diagrama Exergía-Entalpía del ciclo de refrigeración simple.

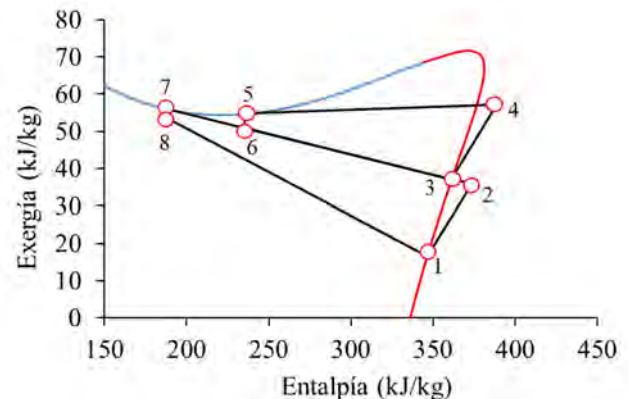


FIGURA 6. Diagrama Exergía-Entalpía del ciclo de refrigeración en cascada.

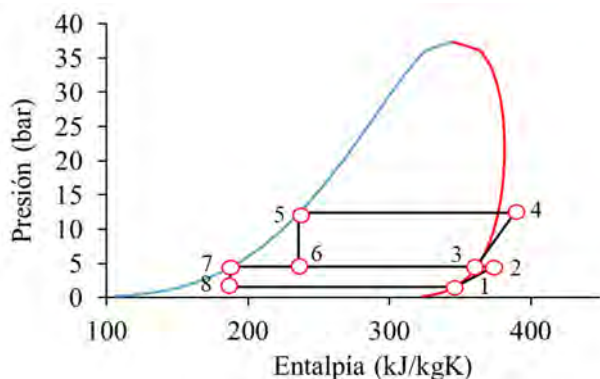


FIGURA 5. Diagrama Presión-Entalpía del ciclo de refrigeración en cascada.

La Fig. 6 muestra el diagrama exergía-entalpía para el ciclo en cascada, evidenciando las variaciones de exergía y entalpía a lo largo de cada proceso. Durante la compresión en ambas etapas, la exergía y entalpía aumentan debido al trabajo suministrado al refrigerante. En la condensación, la entalpía disminuye significativamente mientras que la exergía se reduce por irreversibilidades y pérdidas térmicas. La expansión provoca una caída en la exergía con la entalpía prácticamente constante. Finalmente, en la evaporación, la absorción de calor provoca una disminución de la exergía y aumento de la entalpía, preparando al refrigerante para un nuevo ciclo.

La Figura 7 presenta la comparación del coeficiente de operación (COP) entre el sistema de refrigeración simple (RS) y el sistema en cascada (ReC). Se observa que el valor del COP para el sistema en cascada es significativamente superior al obtenido con el sistema simple. Esta mejora se debe a que la configuración en cascada reduce las relaciones de compresión asociadas al proceso, permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía suministrada. El COP para el sistema de ReC es 14.96 % mayor que la del sistema de RS.

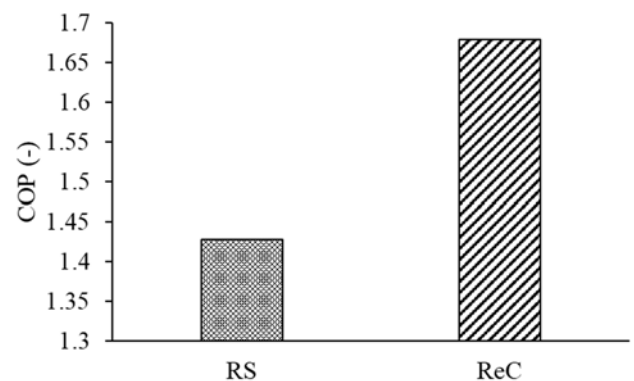


FIGURA 7. Coeficiente de operación (COP) del ciclo de refrigeración simple (RS) y en cascada (ReC).

La Tab. 7 presenta el recurso, producto, irreversibilidad y residuos de los principales equipos del sistema de refrigeración simple. Se observa que el compresor (C) concentra el mayor consumo energético (70.05 kW) y registra la irreversibilidad más elevada (32.33 kW), lo que lo identifica como el componente con mayor impacto negativo en el sistema. La válvula de expansión (VE) presenta también un aporte significativo a las pérdidas, con 11.14 kW de irreversibilidades. En contraste, el evaporador (EVAP)

exhibe un consumo moderado (23.33 kW) y bajas pérdidas (2.76 kW), mientras que el condensador (COND) no presenta aporte de potencia útil, pero sí un residuo de 3.25 kW. Estos resultados evidencian que las estrategias de optimización deben centrarse en el compresor y la válvula de expansión.

TABLA 7. Recurso, producto, irreversibilidad y residuos de los elementos del ciclo de refrigeración simple.

Elemento	$\dot{F}$ (kW)	$\dot{P}$ (kW)	$\dot{I}$ (kW)	$\dot{R}$ (kW)
C	70.05	37.72	32.33	---
COND	3.25	---	---	3.25
VE	49.33	38.19	11.14	---
EVAP	23.33	20.58	2.76	---

La Tabla 8 presenta el recurso, producto, irreversibilidad y residuos de los principales equipos del sistema de refrigeración en cascada. Los resultados muestran que el compresor de baja presión (CBP) y el compresor de alta presión (CAP) concentran la mayor parte de las irreversibilidades, con 11.66 kW y 16.65 kW respectivamente, representando los puntos críticos para la optimización del ciclo. La válvula de expansión del ciclo de alta presión (VEAP) presenta un consumo energético de 50.97 kW, pero con pérdidas relativamente bajas (3.65 kW), mientras que el intercambiador intermedio (EVAP-COND) registra las menores irreversibilidades del sistema (0.22 kW).

TABLA 8. Recurso, producto, irreversibilidad y residuos de los elementos del ciclo de refrigeración en cascada.

Elemento	$\dot{F}$ (kW)	$\dot{P}$ (kW)	$\dot{I}$ (kW)	$\dot{R}$ (kW)
CBP	23.88	12.22	11.66	---
CAP	35.68	19.03	16.65	---
COND	2.50	---	---	2.50
VEAP	50.97	47.31	3.65	---
EVAP-COND	12.88	12.66	0.22	---
VEBP	35.23	33.68	1.55	---
EVAP	23.33	20.58	2.76	---

La Fig. 8 muestra una comparación entre la eficiencia exergética de un sistema simple (RS) y un sistema en cascada (ReC). La eficiencia exergética, entendida como el indicador que mide la capacidad de un sistema para convertir la exergía disponible en trabajo útil, es un parámetro clave para evaluar el desempeño real de sistemas térmicos más allá de lo que permite el análisis energético convencional. Como se observa en el gráfico, el sistema en cascada (ReC) presenta

una eficiencia exergética considerablemente mayor en comparación con el sistema simple (RS). Esta diferencia se debe principalmente al aprovechamiento secuencial de los niveles térmicos en el sistema ReC, lo que permite una recuperación más eficiente de la exergía a distintas temperaturas, minimizando las pérdidas irreversibles típicas en procesos de conversión energética. La η_{ex} para el sistema de ReC es 14.97 % mayor que el sistema de RS.

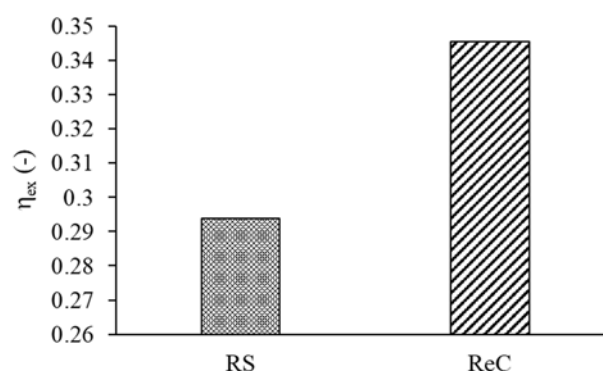


FIGURA 8. Eficiencia exergética (η_{ex}) del ciclo de refrigeración simple (RS) y en cascada (ReC).

4. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre el sistema simple (RS) y el sistema en cascada (ReC) demuestra que la configuración en cascada ofrece ventajas termodinámicas significativas, evidenciadas por un mayor coeficiente de operación (COP) y una eficiencia exergética superior. Estas mejoras se deben principalmente a la reducción de irreversibilidades y al aprovechamiento escalonado de los niveles térmicos, lo que optimiza la conversión de exergía en trabajo útil. El estudio de las irreversibilidades por componente revela que los compresores, tanto de baja como de alta presión, representan las principales fuentes de pérdidas, seguidos por las válvulas de expansión. Esto indica que las estrategias de optimización deben enfocarse en estos equipos para maximizar la eficiencia exergética del ciclo.

No obstante, a pesar de las ventajas demostradas por los sistemas en cascada, su aplicación práctica en el sector de refrigeración comercial y residencial de pequeña y mediana capacidad es limitada. Esta restricción se debe principalmente a factores económicos, de complejidad constructiva y de mantenimiento, así como a la ausencia de lineamientos específicos en las normas de eficiencia energética que promuevan su implementación. Los fabricantes suelen priorizar configuraciones de ciclo simple



debido a su menor costo inicial, facilidad de integración y mayor confiabilidad operativa, aspectos que resultan determinantes en aplicaciones donde la inversión y el espacio disponible son factores críticos.

Asimismo, los resultados obtenidos en este estudio, aunque confirman un mejor desempeño del sistema en cascada, coinciden con conclusiones reportadas previamente en análisis basados en la primera ley de la termodinámica, donde se ha evidenciado que la segmentación térmica del proceso reduce el trabajo de compresión total y mejora la eficiencia global. En este contexto, el presente análisis exergético aporta una evaluación más integral al cuantificar las pérdidas de exergía por componente, reforzando el entendimiento de los mecanismos irreversibles y ofreciendo fundamentos técnicos para el desarrollo de futuros diseños optimizados que hagan viable la adopción de sistemas en cascada en aplicaciones de menor escala.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Planta Piloto 2 (PP2) por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo. Asimismo, se reconoce la valiosa colaboración del grupo de trabajo de Termodinámica, Turbomaquinaria y Energías Sustentables de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAMI).

REFERENCIAS

1. Dincer, I., & Rosen, M. A. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier (2012).
2. Wang, S., et al. *Exergy analysis and optimization of cascade refrigeration systems for ultra-low temperature applications*. International Journal of Refrigeration, 115, 1–12 (2020).
3. Bejan, A. *Advanced Engineering Thermodynamics*. Wiley (2016).
4. Arora, R. C. *Refrigeration and Air Conditioning*. PHI Learning Pvt. Ltd (2013).
5. Gutiérrez, A., et al. *Performance evaluation of R170 as a low-temperature refrigerant in cascade refrigeration systems*. International Journal of Refrigeration, 104, 20–30 (2019).
6. IPCC Climate Change 2021: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC* (2021).
7. Navarro-Esbrí, J., et al. *Safety assessment of flammable refrigerants in refrigeration systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 130, 109964 (2020).

Sergio Castro Hernández. Doctor en Energía y Medio Ambiente (UAM Iztapalapa, 2024) especializado en análisis energético, exergético y exergoeconómico de sistemas térmicos. Profesor universitario en la UAM y UACM (2022–2025), con experiencia en impartición de cursos, dirección de proyectos terminales y formación académica. Investigador y capacitador (2016–2024) en diagnóstico de turbinas, evaluación exergoeconómica, capacitación en normativas ambientales y desarrollo de herramientas computacionales para ingeniería energética. Autor de publicaciones en Entropy y Applied Sciences, y ponente en congresos nacionales e internacionales sobre licuefacción, ciclos combinados, eficiencia energética y refrigeración. Sus áreas de especialidad incluyen termodinámica constructal, termoeconomía, impacto ambiental de ciclos térmicos y recuperación de energía residual. Maneja Thermoflex, COMSOL, Matlab y AutoCAD, con habilidades en comunicación, liderazgo e innovación.



liderazgo e innovación.





Desalinización de agua de mar por cogeneración con turbina de gas

ALEJANDRO TORRES ALDACO¹, RAÚL LUGO LEYTE¹, SERGIO CASTRO HERNÁNDEZ¹, GUILLERMO BENÍTEZ OLIVARES¹, HELEN D. LUGO MÉNDEZ², LUIS P. HERNÁNDEZ CORONA¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco, No. 186, Col. Leyes de Reforma 1^{era} Sección, CDMX, 09310, México.

²Universidad Autónoma Metropolitana, Cuajimalpa, Departamento de Procesos y Tecnología, Av. Vasco de Quiroga, No. 4871, Colonia Santa Fé, CDMX, 05348, México.

Autor de correspondencia Alejandro Torres Aldaco: (e-mail: ata@xanum.uam.mx)

RESUMEN El crecimiento demográfico, el cambio climático y la sobreexplotación de los recursos hídricos han exacerbado este problema, dejando a millones de personas sin acceso a agua segura y limpia para satisfacer sus necesidades básicas. Ante esta situación, la desalinización del agua de mar se ha convertido en una solución viable y prometedora. Se propone establecer una planta desalinizadora de agua de mar utilizando tecnología de trenes de evaporación en el Mar de Cortés, específicamente en Puerto Libertad, Sonora, México. En este trabajo se dimensiona una planta térmica de desalinización con doble propósito: producción de agua potable y electricidad, por cogeneración empleando gases de escape de una turbina de gas que proporcionan 176.57 MW térmicos para un tren de evaporación de tres efectos. Se generan aproximadamente 288,982 kg/h de vapor saturado a 102.6 °C, con un área de intercambio térmico de 4,146 m² por etapa. El sistema produce 90,000 kg/h de agua dulce para una población de 10,000 habitantes y un subproducto de salmuera concentrada al 30 % en peso. Se presentan balances de masa, energía y análisis exergético, demostrando la viabilidad técnica y ambiental del sistema.

PALABRAS CLAVE: Desalinización, cogeneración, tren de evaporación, generación de potencia.

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua potable es un desafío global que afecta a muchas regiones del mundo. El crecimiento demográfico, el cambio climático y la sobreexplotación de los recursos

hídricos han exacerbado este problema, dejando a millones de personas sin acceso a agua segura y limpia para satisfacer sus necesidades básicas. Ante esta situación, la desalinización del agua de mar se ha convertido en una solución cada vez más viable y prometedora. La desalinización del agua de mar es un proceso mediante el cual se elimina la sal y las impurezas del agua salada, convirtiéndola en agua dulce y adecuada para el consumo humano. A medida que la tecnología ha avanzado, la desalinización se ha vuelto más eficiente, económica y ambientalmente sostenible, lo que ha permitido su implementación en diversas regiones del mundo. El monitor de sequía de México reporta que, debido a un sistema de alta presión en los niveles medios de la atmósfera y la escasa humedad en los niveles más bajos en la región noroeste del territorio nacional, provocan que las temperaturas más altas se localicen sobre el norte y noroeste del país, provocando un incremento en la extensión de las áreas de sequía extrema en Sonora, Chihuahua y Durango (Comisión Nacional del Agua, 2021). La desalinización del agua de mar es un proceso mediante el cual se elimina la sal y otras impurezas del agua salada, convirtiéndola en agua dulce y potable. A medida que la tecnología ha avanzado y se ha vuelto más eficiente, la desalinización se ha convertido en una opción atractiva para enfrentar la escasez de agua, especialmente en regiones costeras donde el agua dulce es limitada pero el agua de mar abunda. La desalinización se ha utilizado durante décadas en áreas como Oriente Medio y otras regiones áridas para abordar la falta de agua potable. Sin embargo, con los avances tecnológicos y la disminución de los costos, la desalinización también se ha convertido en una opción más viable para otras regiones del mundo que enfrentan desafíos de escasez de agua. La desalinización del agua de mar ofrece una solución potencialmente viable para





abordar la escasez de agua potable. Aunque el agua de mar representa aproximadamente el 97% de toda el agua en la Tierra, solo una fracción mínima de ella se puede utilizar directamente sin tratamiento. La desalinización permite aprovechar esta fuente abundante pero subutilizada de agua, convirtiéndola en una opción valiosa para aumentar el suministro de agua potable en áreas costeras y áridas. Aunque la desalinización del agua de mar ofrece una solución potencial para la escasez de agua potable, también plantea desafíos significativos. El consumo de energía requerido para el proceso de desalinización es uno de los principales obstáculos, ya que puede ser costoso y contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la eliminación adecuada de la salmuera residual generada durante el proceso y el impacto ambiental asociado son consideraciones críticas que deben abordarse de manera efectiva. Esta problemática es particularmente crítica en regiones áridas y costeras como el noroeste de México, donde las fuentes de agua dulce son escasas y vulnerables (Ghaffour, Missimer, & Amy, 2013). Frente a este escenario, la desalinización del agua de mar se ha consolidado como una alternativa viable y cada vez más eficiente para garantizar el suministro de agua potable. En este contexto, se propone el diseño e implementación de una planta desalinizadora térmica por evaporación multietapas (MED) en el Mar de Cortés, específicamente en Puerto Libertad, Sonora. La planta tiene un doble propósito: la producción de agua potable y la generación de energía eléctrica mediante un sistema de cogeneración con turbina de gas, aprovechando el calor residual de los gases de escape (Zeitoun, 2024). El sistema integra una turbina de gas de 61.8 MW eléctricos, cuyos gases de escape se canalizan a un recuperador de calor para producir vapor saturado a 102.6 °C que alimenta un tren de evaporación de tres etapas en contraflujo (Chacartegui et al., 2009).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Desalinización térmica mediante evaporación multietapas.

El proceso MED se basa en la evaporación secuencial del agua de mar en cámaras conectadas en serie. El vapor de una etapa actúa como fuente térmica para la siguiente, operando a presiones y temperaturas descendentes. Esta reutilización del calor reduce significativamente el consumo energético específico. La Integración con cogeneración implica la producción simultánea de electricidad y calor útil a partir de una única fuente. Las turbinas de gas, además de generar electricidad, emiten gases de escape a temperaturas de 450–

600 °C, que permite recuperar energía térmica mediante calderas de recuperación (HRSG). Esta energía térmica es ideal para procesos como MED que operan a temperaturas moderadas (70–120 °C) (Zeitoun, 2024). El sistema MED presenta las siguientes ventajas:

- Aprovechamiento del calor residual que de otro modo se perdería en la atmósfera
- Reducción del consumo específico de energía primaria
- Disminución de emisiones contaminantes por quema de combustibles
- Producción simultánea de agua potable y energía, optimizando recursos

El proceso MED se basa en la evaporación secuencial del agua de mar en cámaras conectadas en serie. El vapor generado en una etapa actúa como fuente térmica para la siguiente, operando a presiones y temperaturas descendentes, lo que permite la reutilización eficiente del calor y reduce el consumo energético específico (Al-Karaghoulí & Kazmerski, 2013; Ghaffour et al., 2013). La cogeneración permite la producción simultánea de electricidad y calor útil a partir de una única fuente, incrementando la eficiencia energética global del sistema. Las turbinas de gas generan gases de escape a temperaturas elevadas (450–600 °C), que pueden ser aprovechadas mediante calderas de recuperación (HRSG) para procesos térmicos como la desalinización MED, que opera típicamente en rangos de temperatura moderados (70–120 °C) (Kalogirou, 2005; Zeitoun, 2024). El análisis exergético permite evaluar la eficiencia con la que la energía disponible se transforma en trabajo útil o producto final, considerando las irreversibilidades del proceso (Bajan, 2016; Dincer & Rosen, 2013). Para el tren de evaporación MED, el análisis exergético permite identificar los efectos con mayor generación de irreversibilidad, típicamente en el primer efecto debido a la mayor diferencia de temperatura y pérdidas térmicas (Laguerre & Wunsch, 2019). El cálculo detallado de la exergía de cada corriente implica conocer las propiedades termodinámicas (entalpía, entropía) respecto a un estado de referencia ambiental, normalmente a 25 °C y 1 atm (Bejan, 2016).

3. METODOLOGÍA

La planta desalinizadora se consideró ubicar en Puerto Libertad, Sonora, región árida con escasa disponibilidad de agua dulce, pero acceso inmediato al Mar de Cortés y condiciones favorables para infraestructura energética, la figura 1 muestra el tren de evaporación de tres etapas que se consideró. Las tablas 1, 2 y 3, presentan los balances de masa



y energía de los sistemas de evaporación de tres etapas. Para el dimensionamiento del sistema las bases de diseño se muestran en la tabla 5, flujo de agua: 100000 kg/h, salinidad del agua de mar: 3%, potencia eléctrica de la turbina de 61.8 MW se realizó los balances de masa y energía en cada componente. Para el cálculo de superficies de intercambio. Se considera una alimentación F de 100,000 kg/h de agua de mar con 3% de sal, operando en contracorriente. La presión en el tercer efecto se establece como 0.1 atm. El coeficiente global de transferencia de calor se consideró de 590 kW/m²°C, el sistema de evaporación opera hasta una concentración máxima de la salmuera de 30%, el flujo g₆ es igual a V_f que es el flujo de vapor externo que alimenta al evaporador 1, C₁, C₂, y C₃ son los de las corrientes concentradas a la salida de cada evaporador en Kg/h, X₁, X₂ y X₃ son las concentraciones de sal en cada etapa en % peso, X_f es la concentración de la corriente de alimentación. V₁, V₂ y V₃ corresponden a los flujos de vapor en cada etapa de evaporación.

La figura 2 muestra los componentes de la turbina de gas y su caldera de recuperación que produce el vapor para alimentar el tren de evaporación. Donde: g₀ es el flujo de agua a la entrada a la caldera de recuperación, g₁ es el flujo de aire a la entrada al compresor de la turbina de gas, g₂ es el flujo de aire a la salida del compresor, g₃ es el flujo de gases de combustión a la entrada de la turbina de gas, g₄ es el flujo de gases de escape a la entrada de la caldera de recuperación de calor, g₅ es el flujo de gases a la salida de la caldera de recuperación de calor, g₆ es el flujo de vapor a la salida de la caldera de recuperación de calor, todos los flujos están definidos en Kg/s.

Se utilizaron herramientas como, MATLAB y cálculos termodinámicos estándar para estimar rendimiento térmico y eficiencia exergética a partir de datos de operación. El ciclo termodinámico considera una turbina de gas con potencia eléctrica de 61.8 MW y eficiencia térmica del 35 %. En las tablas 4 y 5 se describe los principales estados de la turbina.

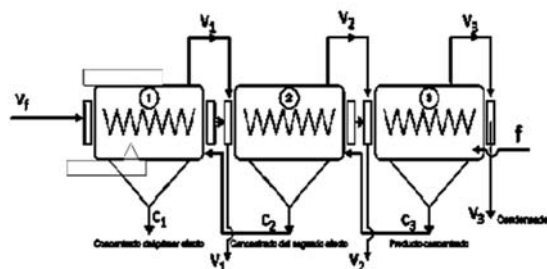


FIGURA 1. Tren de evaporación propuesto de tres etapas.

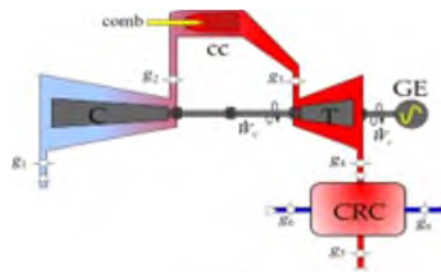


FIGURA 2. Componentes de la turbina de gas y caldera de recuperación de calor.

El flujo másico del vapor generado es de aproximadamente 8.03 kg/s, usado para alimentar el tren de evaporación.

TABLA 1. Balances de masa y energía del evaporador 1.

$$\begin{aligned}
 V_f + C_2 &= V_f + V_1 + C_1 \\
 C_2 &= V_1 + C_1 \\
 \text{Balance de Solutos} \\
 X_2 C_2 &= X_{C1} C_1 + X_{E1} V_1 \\
 X_2 C_2 &= X_{C1} C_1 \\
 \text{Balance de energía en el evaporador 1} \\
 V_f H_{Vf} + C_2 h_{C2} &= V_f h_{Vf} + V_1 H_{E1} + C_1 h_{C1} \\
 V_f &= \frac{V_1 H_{V1} + C_1 h_{C1} - C_2 h_{C2}}{H_{Vf} - h_{Vf}}
 \end{aligned}$$

TABLA 2. Balances de masa y energía del evaporador 2.

$$\begin{aligned}
 V_1 + C_3 &= V_1 + V_2 + C_2 \\
 C_3 &= V_2 + C_2 \\
 \text{Balance de Energía del Evaporador 2} \\
 V_1 H_{E1} + C_3 h_{C3} &= V_1 h_{V1} + V_2 H_{V2} + C_2 h_{C2} \\
 V_1 (H_{E1} - h_{V1}) &= V_2 H_{V2} + C_2 h_{C2} - C_3 h_{C3} \\
 V_1 &= \frac{V_2 H_{E2} + C_2 h_{C2} - C_3 h_{C3}}{(H_{V1} - h_{V1})}
 \end{aligned}$$

TABLA 3. Balances de masa y energía del evaporador 3.

$$\begin{aligned}
 V_2 + F &= V_2 + V_3 + C_3 \\
 F &= V_3 + C_3 \\
 \text{Balance de Energía del Evaporador 3} \\
 V_2 H_{E2} + F h_F &= V_2 h_{V2} + V_3 H_{V3} + C_3 h_{C3} \\
 E_2 (H_{E2} - h_{E2}) &= V_3 H_{V3} + C_3 h_{C3} - F h_F \\
 V_2 &= \frac{V_3 H_{V3} + C_3 h_{C3} - F h_F}{(H_{V2} - h_{V2})}
 \end{aligned}$$

La Tabla 4, muestra las bases de diseño del sistema de desalinización por cogeneración:

TABLA 4. Balances de masa y energía del evaporador 4.

Corriente	Caudal (kg/h)	Salinidad (%)
Agua de mar (entrada)	100,000	3
Agua dulce (salida)	90,000	0
Salmuera (rechazo)	10,000	30
Componente	Energía (MW)	
Potencia eléctrica	61.8	



Corriente	Caudal (kg/h)	Salinidad (%)
Potencia térmica	176.57	

3.1. Análisis exergético

El análisis exergético evalúa el uso eficiente de la energía y las irreversibilidades dentro del sistema. La exergía suministrada por el combustible se transforma en trabajo eléctrico y energía térmica útil para la desalinización. Las principales pérdidas exergéticas se identifican en la turbina, el recuperador de calor y los evaporadores. El coeficiente exergético global se define por la ecuación: (1)

$$\dot{E}_c = \dot{W}_{\text{eléctrico}} + \dot{E}_{\text{térmica}} + \dot{E}_{\text{perdidas}} \quad (1)$$

Donde, $\dot{E}_c$ corresponde a la exergía del combustible definida por la ecuación: (2)

$$\dot{E}_c = \dot{m}_c[(h_c - h_r) - T_0(s_c - s_r)] \quad (2)$$

Donde $\dot{m}_c$, es el flujo de combustible, h_c y h_r corresponden a las entalpías del combustible y la entalpía a la temperatura de referencia, del mismo modo S_c y S_r corresponden a las entropías del combustible y la entropía a la temperatura de referencia y T_0 corresponde a la temperatura de referencia.

Por otra parte, la exergía térmica $\dot{E}_t$ está definida por la ecuación: (3) que, corresponde a la exergía aprovechada para la generación de vapor en el proceso de desalinización

$$\dot{E}_t = \dot{m}_v[(h_c - h_r) - T_0(s_c - s_r)] \quad (3)$$

Donde $\dot{m}_v$ corresponde al flujo de vapor en el recuperador de calor. Las pérdidas asociadas a la turbina, intercambiadores, evaporadores y otras pérdidas termodinámicas corresponden a las irreversibilidades del sistema que se denomina exergía de pérdidas $\dot{E}_p$. La eficiencia exergética del sistema se define por la ecuación: (4)

$$\eta_{ex} = \frac{(\dot{W}_e + \dot{E}_t)}{\dot{E}_c} \quad (4)$$

4. RESULTADOS

El análisis de desempeño del sistema de cogeneración con un tren de evaporación de tres etapas, acoplado a una caldera de recuperación de calor (CRC), revela importantes hallazgos en términos de eficiencia energética y exergética. Según los datos de la Tabla 5, la CRC produce 8.03 kg/s de vapor saturado a 102.6 °C y 1 atm, lo cual constituye la fuente térmica para el sistema de desalación. Este valor representa un aprovechamiento significativo de la energía residual de los gases de escape de la turbina, lo que permite reducir la dependencia de fuentes de calor externas. El tren de evaporación de tres efectos logra evaporar 90,000 kg/h de

agua, con un consumo de 28,908 kg/h de vapor vivo, lo que resulta en una economía del vapor de aproximadamente 3.11 kg de agua evaporada por kg de vapor vivo. Este valor supera el promedio típico para sistemas de múltiples efectos (2.5–2.8), indicando un buen diseño térmico e integración energética entre etapas. Este resultado puede atribuirse a una adecuada distribución de las temperaturas de operación (84 °C, 65 °C y 46 °C respectivamente), que favorecen una eficiente recuperación de calor latente entre efectos.

Como se muestra en la Tabla 6, el análisis exergético evidencia que la mayor destrucción de exergía se localiza en la turbina de gas (123 MW), debido principalmente a las irreversibilidades en el proceso de combustión. El tren de evaporación ocupa el segundo lugar en términos de exergía destruida (10 MW), lo que representa un 30.1 % de eficiencia exergética, considerablemente menor que la del recuperador de calor (65 %). El bajo rendimiento exergético del sistema de evaporación se explica por las irreversibilidades inherentes a las transferencias de calor a baja diferencia de temperatura, típicas en procesos de evaporación multietapa. La alta destrucción de exergía en la primera etapa respecto a la segunda y tercera, se debe a que el primer efecto opera a mayor temperatura, lo que conlleva mayores gradientes térmicos y pérdidas más significativas. La eficiencia exergética global del sistema se estimó en 45 %, lo cual es consistente con valores reportados para plantas de cogeneración integradas a desalación térmica, según la literatura [10]. Este rendimiento refleja un aprovechamiento adecuado del combustible, convirtiendo el 36.5 % de la exergía del combustible en productos útiles, con un 75 % de pérdidas irreversibles, mayormente concentradas en la combustión y evaporación. Este resultado destaca el potencial de mejora en el diseño del sistema, especialmente en el tren de evaporación. Estrategias como la compresión térmica del vapor, podrían explorarse para reducir las pérdidas exergéticas. El sistema alcanza una producción de 90 m³/h de agua dulce, con una salmuera concentrada al 30 % en peso, generando 30,600 toneladas de sal por año como subproducto. Esta concentración sugiere un alto grado de recuperación del agua contenida en la salmuera, lo cual es deseable desde una perspectiva de eficiencia y sostenibilidad. La figura 3 presenta un diagrama de Sankey, esta representación permite visualizar la distribución y degradación de la exergía a lo largo del proceso. El sistema parte de una exergía total de entrada de 183.8 MW, correspondiente a la energía química del combustible suministrado a la turbina de gas. A partir de esta entrada, se observa que: 61.8 MW son convertidos en exergía útil, que representa una eficiencia de conversión directa del 33.6 %, que corresponde con los valores de turbinas industriales con



combustión interna. El flujo remanente de gases calientes se canaliza hacia el recuperador de calor, que logra transferir 14.3 MW de exergía útil al sistema, con una eficiencia del 65 % respecto a su entrada específica. Desde el recuperador de calor, solo 4.3 MW son finalmente aprovechados como exergía útil en el sistema de evaporación multietapas, lo que representa una caída significativa en la calidad energética disponible. Esta pérdida está asociada principalmente a las irreversibilidades térmicas en el proceso de evaporación, particularmente en las transferencias de calor a baja temperatura y en gradientes pequeños, los cuales son termodinámicamente ineficientes.

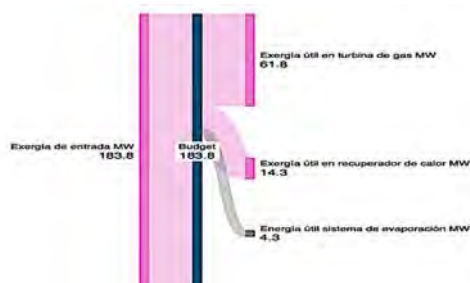


FIGURA 3. Distribución de los flujos de exergía en el sistema de desalinización.

La figura 4 muestra que el total de exergía de entrada (183.8 MW), solamente 80.4 MW son convertidos en productos útiles, lo que implica que más del 56 % de la exergía se pierde por irreversibilidades internas, especialmente en los procesos de combustión, expansión y transferencia térmica. Estas pérdidas son consistentes con los resultados previamente reportados en la Tabla 6, donde la turbina de gas y el tren de evaporación son los principales focos de destrucción de exergía (123 MW y 10 MW respectivamente). La eficiencia exergética global del sistema, de aproximadamente 45 %, se ve limitada por estos procesos, aunque sigue siendo superior a la de muchos sistemas convencionales no integrados.



FIGURA 4. Distribución de los flujos de exergía en el sistema de desalinización

La tabla 7 muestra los resultados del dimensionamiento del tren de evaporación de tres etapas aprovechado el calor residual en la caldera de recuperación, cada etapa requiere 1834 m² de superficie de intercambio de calor para un total del sistema de 5502 m² con un flujo de calor aprovechado de 135 MW y un flujo de exergía total disponible de 32.4 MW y 102.6 MW de exergía destruida. El análisis exergético muestra que las principales irreversibilidades ocurren en la turbina de gas por la combustión y disipación térmica y en los evaporadores, debido a las transferencias de calor. La eficiencia exergética global del sistema se estimó en 45%, lo cual está en concordancia con valores reportados para sistemas acoplados a cogeneración. El sistema produce 90 m³/h de agua dulce, equivalente, con una corriente de salmuera de rechazo concentrada al 30% en peso de sal, que corresponde a un subproducto de 30,600 toneladas de sal anual.

TABLA 5. Estados termodinámicos de las corrientes de entrada y salida de la turbina y caldera de recuperación.

Estado	Descripción	Presión (atm)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Entropía (kJ/kg·K)	Flujo másico (kg/s)
1	Aire comprimido	15	450	1150	1.85	15.0
2	Aire combustible (entrada)	15	1100	1500	2.1	15.0
3	Gases de escape (entrada turbina)	15	1100	1500	2.1	15.0
4	Gases salida turbina	1	500	1000	1.9	15.0
5	Vapor saturado (CRC salida)	1	102.6	2700	7.0	8.°03

TABLA 6. Flujos de exergía y eficiencia exergética en cada componente del sistema de cogeneración.

Componente	Exergía entrada (MW)	Exergía útil (MW)	Exergía destruida (MW)	Eficiencia exergética (%)
Turbina de gas	183.8	61.8	121.3	34.0
Recuperador de calor	22.0	14.3	7.7	65.0
Sistema MED (3 efectos)	14.3	4.3	10.0	30.1

TABLA 7. Especificaciones y condiciones de operación del tren de evaporación.

Efecto	Área (m ²)	Temperatura (°C)	Calor transferido (MW)	Exergía térmica disponible (MW)	Exergía destruida (MW)
1	1834	84	83.6	20.0	63.6
2	1834	65	25.7	6.2	19.5
3	1834	46	25.7	6.2	19.5
Total	5502		135.0	32.4	102.6



5. CONCLUSIONES

El diseño propuesto demuestra la viabilidad técnica de una planta de desalinización con cogeneración en Puerto Libertad, dando uso a los gases de escape de la turbina de gas mejora la sostenibilidad energética y ambiental del sistema. La producción de agua dulce satisface la demanda de 10,000 habitantes, con un aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles. Por otra parte, la generación eléctrica que produce el sistema puede abastecer de electricidad a 30000 hogares cada hora. El sistema de desalinización por cogeneración proporciona otro subproducto no menos importante que corresponde a 30600 toneladas anuales de sal producto altamente demandado por la industria química, alimentos, metalúrgica entre otras. La integración de turbinas de gas con sistemas de evaporación multietapas en contraflujo es una solución técnica y energéticamente eficiente para la producción de agua potable en regiones áridas. El análisis exergético confirma que la cogeneración optimiza el uso del combustible y la energía térmica residual, reduciendo el impacto ambiental. De los procesos involucrados desde la combustión hasta la producción de agua, es evidente el carácter irreversible del sistema. El mayor aprovechamiento ocurre en la turbina de gas, seguido por el recuperador de calor, mientras que el sistema de evaporación presenta la menor eficiencia exergética. El dimensionamiento adecuado de las superficies de intercambio térmico en los evaporadores es crucial para asegurar la eficiencia operativa. respalda cuantitativamente la necesidad de mejoras en los procesos de transferencia térmica de baja temperatura y tecnologías que reduzcan irreversibilidades.

REFERENCIAS

Artículos

- [1] Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L. L. (2013). *Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 343-356. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.068>
- [2] Chacartegui, R., et al. (2009). *Thermal desalination technologies and current trends: A review*. Desalination, 245(1-3), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.007>
- [3] Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). *Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for*

- better water supply sustainability*. Desalination, 309, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.015>
- [4] Kalogirou, S. A. (2005). *Seawater desalination using renewable energy sources*. Progress in Energy and Combustion Science, 31(3), 242-281. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2005.02.001>
- [5] Laguerre, O., & Wünsch, M. (2019). *Integration of waste heat in cogeneration plants for seawater desalination*. Energy, 181, 729-740. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.183>
- [6] Sakthivel, S., & Subramanian, K. S. (2017). *Energy efficient design of multi-effect distillation desalination systems with cogeneration*. Desalination, 417, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.021>
- [7] Zeitoun, O. (2024). *Integration of cogeneration systems with desalination plants: Thermal energy recovery and utilization*. Renewable Energy, 202, 900-912. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.12.005>
- [8] Zhou, J., et al. (2021). *Recent advances in multi-effect distillation desalination technologies: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144, 111032. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111032>

Libros

- [9] Bejan, A. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics* (4th ed.). Wiley.
- [10] Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development* (2nd ed.). Elsevier.





Secado solar de biomásas como etapa de pretratamiento para la industria farmacéutica

CYNTHIA JAQUELINE LÓPEZ VEGA¹, NICTÉ JULIETA PEREZ VIRAMONTES¹, MARÍA SORAYA OSEGUEDA ROBLES¹, VÍCTOR AGUIRRE ARMENTA¹, VERONICA ÁVILA VÁZQUEZ², ALÁN RUBÉN CALZADA HERNÁNDEZ^{1*}

¹Instituto Politécnico Nacional, Unidad Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Guanajuato, Av. Mineral de Valenciana No. 200 Fracc. Industrial Puerto Interior Silao de la Victoria, Guanajuato. C.P. 36275, México;

²Instituto Politécnico Nacional, Unidad Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, Blvd. Del Bote 202 Cerro del Gato Ejido la Escondida, Col. Ciudad Administrativa 98160, Zacatecas, Zac., México.

Autor de Correspondencia: Alán Rubén Calzada Hernández (e-mail: arcalzadah@ipn.mx).

“Este trabajo fue financiado por el Instituto Politécnico Nacional, bajo los números de proyecto 20242281 y 20254405”

RESUMEN

En este estudio se comparó la eficiencia de secado solar (tipo gabinete de cielo abierto) frente al convencional (estufa de convección a 60°C) en biomásas que tendrán una aplicación farmacéutica (agave, olotes, romero, lavanda, manzanilla), evaluando humedad residual y cinética de secado. Se determinó la cantidad de humedad presente en las diferentes muestras de biomasa por medio de una balanza termogravimétrica. Los resultados revelaron que el secado solar permitió obtener cantidades similares de remoción de humedad que una estufa de laboratorio convencional para agave (85.83 % de humedad), olotes (74.07 % de humedad) y romero (55.03 % de humedad), en periodos de tiempo de 4-6 horas. Las curvas cinéticas confirmaron un comportamiento típico: periodo lineal de velocidad constante seguido de desaceleración tras 200 min, influenciado por textura y composición de cada biomasa, además de que se hizo un ajuste de diferentes tipos de ecuaciones de cinética de secado. Además, que él se evaluó la disponibilidad de irradiación solar en el punto de ubicación del secador solar, la temperatura ambiente, la temperatura dentro del gabinete, realizando el secado solar por medio de convección natural y convección forzada de aire, con una velocidad de 6 m/s. Estos hallazgos aportan bases para diseñar operaciones de deshidratación energéticamente eficientes en farmacéutica, integrando energía renovable sin comprometer calidad bioactiva.

PALABRAS CLAVE: Secado solar, biomásas, modelos de secado.

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de biomasa vegetal para la obtención de productos de alto valor agregado —como bioetanol, aceites esenciales, biodiesel y compuestos con aplicaciones en las industrias cosmética y farmacéutica— ha cobrado relevancia en los últimos años debido a la creciente demanda por procesos más sostenibles y el uso de ingredientes naturales[1]. Sin embargo, la transformación eficiente de la biomasa requiere de un adecuado pretratamiento, donde el secado representa una de las operaciones unitarias más críticas. Esta etapa tiene un impacto directo en la conservación, almacenamiento y calidad del producto final, especialmente en matrices sensibles como las plantas aromáticas o medicinales.

El secado convencional, que generalmente utiliza corrientes de aire caliente generadas mediante combustibles fósiles o energía eléctrica, permite reducir la humedad del material, incrementar la concentración de solutos, facilitar el transporte y prolongar la vida útil del producto [2]. No obstante, este proceso implica un elevado consumo energético y una huella ambiental considerable. En contraste, el secado solar surge como una alternativa energética limpia, accesible y



sustentable, particularmente viable en regiones con alta irradiación solar como México [2], [3], [4].

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica y ambiental del secado solar de tipo gabinete como alternativa al secado convencional para el tratamiento de biomasa vegetal con potencial uso industrial. Para ello, se diseñó y construyó un secador solar que fue ensayado con cinco tipos de biomasa (romero, agave, olotes, manzanilla y lavanda), bajo condiciones reales de radiación solar. Se cuantificaron parámetros operativos clave como la temperatura interna del secador y la humedad residual, comparando el desempeño con una estufa de laboratorio convencional. Asimismo, se ajustaron modelos cinéticos de secado, destacando el modelo de Henderson y Pabis como el que mejor describió el proceso.

Los resultados obtenidos evidencian que el secador solar, especialmente bajo convección natural, no solo reduce el consumo energético y las emisiones asociadas, sino que también ofrece una deshidratación eficiente y uniforme, posicionándolo como una opción tecnológica adecuada para el pretratamiento de biomasa en cadenas productivas sostenibles.

2. METODOLOGÍA

Para evaluar el comportamiento del secado de distintas biomasa vegetal (agave, olotes, manzanilla, romero y lavanda), se realizaron tres etapas experimentales: determinación de humedad, secado convencional y secado solar, empleando herramientas de medición y registro específicas para cada caso.

2.1. Determinación de humedad total

La humedad inicial de cada biomasa se determinó utilizando una balanza termogravimétrica marca ADAM. Se colocaron 10 g de muestra sobre el plato de secado, distribuyéndola de forma uniforme. Se verificó la limpieza, calibración y correcto funcionamiento del equipo antes de cada medición. Esta etapa permitió establecer una referencia para calcular la pérdida de humedad durante los ensayos de secado.

2.1. Secado convencional

Se empleó una estufa de vacío marca Memmert operando a 60 °C. Para cada tipo de biomasa, se tomaron muestras de 10 g y se realizaron secados por triplicado. El peso se registró a intervalos definidos: cada 10 minutos durante la primera hora, cada 20 minutos en la segunda y cada 30 minutos en la tercera, hasta completar tres horas de proceso. Con estos datos se

construyeron curvas de secado (peso relativo vs. tiempo) y se estimó el consumo energético total de la estufa con base en su potencia nominal y el tiempo de operación.

2.1. Secado solar y registro de irradiación

El secado solar se realizó en un secador tipo gabinete de convección natural y convección forzada por medio de un ventilador ajustado a una velocidad de corriente de aire de 6 m/s, Figura 1. Durante el proceso se registraron la temperatura y la humedad relativa interna mediante termopares y un termohigrómetro, respectivamente. Asimismo, se monitoreó el peso de las muestras a lo largo del tiempo para construir las curvas de secado correspondientes.



FIGURA 1. Secador solar de gabinete en funcionamiento.

Paralelamente, se cuantificó la irradiación solar disponible en el sitio de estudio (Silao, Guanajuato) durante una semana en verano y otoño, utilizando un luxómetro digital. Se generaron gráficas de irradiación en función del tiempo para identificar los picos diarios y caracterizar la disponibilidad energética para el proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como punto de partida, se determinó la humedad total de las biomasa utilizando una balanza termogravimétrica. Esta medición sirvió como referencia para evaluar la capacidad de eliminación de humedad de los otros métodos aplicados: el secado convencional en estufa de convección y el secador solar tipo gabinete. La comparación de estos tres enfoques permitió analizar su eficacia relativa en términos de deshidratación [5].

$$\text{Humedad (bh)} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa total de la biomasa}} \times 100, \quad (1)$$

En la Tabla 1 se presentan los valores de porcentaje de humedad en base húmeda obtenidos para cada biomasa, calculados según la ecuación (1), con su respectiva desviación estándar.

TABLA 1. Comparación de los porcentajes de humedad en balanza y estufa de convección y secador solar

% HUMEDAD (bh)					
	Romero	Agave	Olotés	Manzanilla	Lavanda
Balanza	52.64% ±0.81	71.50% ±0.535	51.87% ±0.985	85.71% ±0.536	67.12% ±0.73
Estufa de convección	43.83% ±1.392	49.89% ±1.517	43.55% ±1.449	42.67% ±1.345	50% ±1.635
Secador (convección natural)	56.17% ±2.044	60.94% ±2.125	72.80% ±2.533	80.69% ±2.984	55.52% ±1.975
Secador (convección forzada)	58.37% ±1.967	66.00% ±2.353	74.88% ±2.561	80.60%± 2.708	56.80% ±1.953

Con la finalidad de hacer un análisis de los resultados de secado bajo cada condición, se calculó la humedad en base seca (X), la cual se define mediante la ecuación (2) [5].

$$X = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa seca de la biomasa}} \times 100, \quad (2)$$

Los valores de humedad en base seca se reportan en la Gráfica 1, para el caso del secado de todas las biomásas en la estufa de convección.



GRÁFICA 1. Curva de secado para todas las biomásas en estufa de convección.

De igual manera se presentan los resultados de los valores de humedad en base seca, para de todas las biomásas empleando el secador solar en condición de convección natural y convección forzada, Gráfica 2 y Gráfica 3, respectivamente.



GRÁFICA 2. Curva de secado para secador solar (convección natural).



GRÁFICA 3. Curva de secado para secador solar (convección forzada).

Al realizar esta comparación, se observó que, durante las primeras tres horas de secado, el secador solar tipo gabinete retiró un mayor porcentaje de humedad que la estufa de convección. Este resultado coincidió con lo reportado en diversos estudios que destacan la eficiencia inicial del secado solar, especialmente cuando hay un adecuado flujo de aire y captación solar. Un aspecto diferenciador entre la estufa de laboratorio y el secador solar es la ventilación con la que cuentan, ya que en el caso de la estufa esta tiene muy poca ventilación lo cual dio lugar a que se saturara de humedad dentro disminuyendo su capacidad de secado [15].

Los secadores solares concentrados necesitan un flujo de aire adecuado para mantener eficiencia, pues la falta de ventilación limita la capacidad de extraer humedad efectivamente. De igual forma, Ekka y Bala (2020)

demonstraron que, en configuraciones mixtas de secadores de gabinete, el control del flujo de aire reduce significativamente el tiempo de secado y mejora la eficiencia [16].

Para evaluar el comportamiento de las curvas de secado, se aplicaron tres modelos cinéticos diferentes con el fin de determinar cuál se ajusta mejor a los datos experimentales. Todos los modelos se basan en el parámetro de la razón de humedad, MR, que se calcula como el cociente entre la humedad inicial y la humedad final de las muestras.

Modelo de Henderson & Pabis (MHP): Este modelo es ampliamente utilizado en estudios de secado y se basa en una expresión exponencial que describe la disminución del contenido de humedad con el tiempo, considerando una o varias fases de secado. Es particularmente útil para materiales que presentan un secado con una única etapa predominante [6].

$$MR = a \exp(-k t), \quad (3)$$

Donde t es el tiempo de secado, a es una constante adimensional relacionada con la estructura de la biomasa, k es una constante de velocidad en min^{-1} o h^{-1} .

Modelo de Newton (MN): También conocido como modelo de secado exponencial simple, es uno de los modelos más básicos y populares para describir procesos de secado. Asume que la velocidad de secado es proporcional al contenido de humedad remanente, lo que resulta en una cinética de primer orden [6].

$$MR = a \exp(-k t), \quad (4)$$

Donde t es el tiempo de secado, k es una constante de velocidad en min^{-1} o h^{-1} .

Modelo de la Doble Cinética (MDC): Este modelo es una extensión de los anteriores y considera dos fases de secado con diferentes tasas, lo que permite capturar de manera más precisa procesos complejos donde la velocidad de secado varía en distintas etapas, como en materiales heterogéneos o con estructuras complejas [6].

$$MR = a \exp(-k t), \quad (5)$$

Donde t es el tiempo de secado, a y b parámetros adimensionales relacionados con la fracción de agua que se elimina en cada fase, k_0 y k_1 son constantes de velocidad en min^{-1} o h^{-1} .

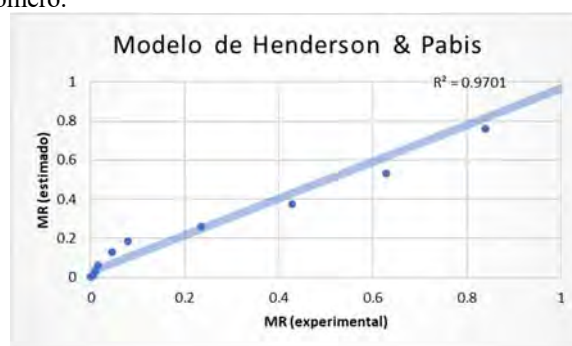
El ajuste de los modelos a las curvas de cinética de secado se realizó por medio del método de mínimos cuadrados no lineales y para seleccionar el modelo más adecuado, se calculó el porcentaje de error cuadrático medio (RSS, por sus siglas en inglés) entre los valores experimentales y los valores predichos por cada modelo [13]. Este criterio permite cuantificar la precisión del ajuste, identificando el modelo que minimiza el error y, por ende, representa mejor la cinética de secado de la biomasa bajo las condiciones estudiadas.

Estos tres modelos se emplearon para cada biomasa en el secador solar, pero para fines prácticos de información solo se presentan los parámetros estimados del romero. En la Tabla 2, se presentan los resultados obtenidos de los parámetros del modelo para el caso del secado por convección natural.

TABLA 2. Parámetros cinéticos de los modelos de secado solar en convección natural.

Biomasa	Modelo	Parámetros del modelo (k , k_0 y k_1 (h^{-1}))	RSS	R^2
Romero	MHP	$a = 1.0829$ $k = 2.1304$	0.0465	0.9701
	MN	$k = 1.9831$	0.0561	0.9717
	MDC	$a = 0.5414$ $b = 0.5414$ $k_0 = 2.1304$ $k_1 = 2.1304$	0.0465	0.9701

La Gráfica 4, muestran la correlación que se obtuvo del ajuste de los valores estimados por el modelo MHP a los datos experimentales del secado solar por convección natural de Romero.



GRÁFICA 4. Curva de correlación de los datos experimentales con los del modelo MHP para romero en el secador solar (convección natural).

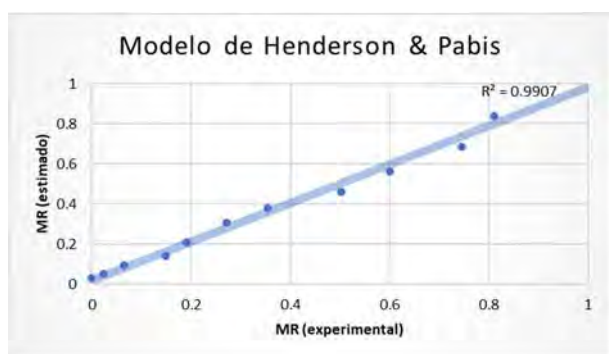
En la Tabla 3, se presentan los resultados obtenidos de los parámetros del modelo para el caso del secado por convección forzada para el caso del romero.



TABLA 3. Parámetros del modelo para el caso del secado por convección forzada para el caso del romero

Biomasa	Modelo	Parámetros del modelo (k , k_0 y k_1 (h^{-1}))	RSS	R^2
Romero	MHP	$a = 1.0260$ $k = 1.2009$	0.0126	0.9907
	MN	$k = 1.1659$	0.0138	0.9915
	MDC	$a = 0.5084$ $b = 0.5176$ $k_0 = 1.2009$ $k_1 = 1.2009$	0.0126	0.9907

La Gráfica 5, muestran la correlación que se obtuvo del ajuste de los valores estimados por el modelo MHP a los datos experimentales del secado solar por convección forzada de Romero.



GRÁFICA 5. Curva de correlación de los datos experimentales con los del modelo MHP para romero en el secador solar (convección forzada).

Con respecto a los diferentes modelos de cinética de sacado evaluados en este trabajo, todos mostraron un valor muy alto de correlación entre los datos estimados por el modelo y los valores experimentales obteniendo R^2 entre 0.97 y 0.99. Los modelos de Henderson y Pabis y el de doble cinética presentaron un menor valor de RSS, describiendo mejor la cinética de secado de las biomásas. Sin embargo, el modelo de doble cinética prácticamente no mostro diferencia con el modelo de Henderson y Pabis, ya que el secado del romero es muy lineal durante el tiempo.

De acuerdo con lo estimado en este trabajo el parámetro a del MHP, se encuentra en el rango de 1.0 a 1.08 estos valores están asociados a una fase inicial de secado rápida y uniforme sin presencia de piel dura o resistencia al transporte de humedad [7]. En comparación entre el secado solar con convección natural y forzada, el parámetro de k en el MHP, relacionado con la velocidad de secado, para el caso del romero mostro un valor alto cercano a 2.13 para la convección

natural, mientras que, por convección forzada disminuyo 1.2. Esto indica una velocidad de secado más alta por convección natural debido a que se permite que el aire caliente dentro del secador tenga un tiempo de residencia más alto, caso contrario con la convección forzada donde se disminuyen tiempos de residencia del aire, por lo tanto, menor interacción en entre el sólido y aire.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió comparar de manera efectiva tres métodos de secado aplicados a biomásas vegetales: la termobalanza, la estufa de convección y un secador solar tipo gabinete. A través del análisis de la pérdida de humedad y el comportamiento térmico a lo largo del tiempo, se determinó que tanto el secado convencional como el solar pueden ofrecer resultados comparables en términos de reducción de humedad, con variaciones atribuibles principalmente a las condiciones ambientales y al control del proceso. De acuerdo, a lo estimado con los modelos de cinética de secado, se puede concluir que las biomásas empleadas en este trabajo tienen una velocidad alta de secado, estos resultados sugieren un proceso de secado uniforme y eficiente, favorecido por las condiciones ambientales y las propiedades físicas de las biomásas, lo que respalda la viabilidad del secado solar como alternativa técnica para la deshidratación de biomasa vegetal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN) por el apoyo financiero otorgado para la realización de este proyecto, a través de los proyectos con clave SIP-20242281 y SIP-20254405, los cuales hicieron posible el desarrollo experimental, el análisis de datos y la difusión de los resultados de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] B. Panchal, C.-H. Su, C.-C. Fu, S.-J. Wu, y H.-Y. Juan, «Ecofriendly and cost-effective biodiesel production from water containing feedstocks through electrolysis- a review», *Fuel Process. Technol.*, vol. 276, p. 108277, oct. 2025, doi: 10.1016/j.fuproc.2025.108277.
- [2] H. S. EL-Mesery y S. E. El-khawaga, «Drying process on biomass: Evaluation of the drying performance and energy analysis of different dryers», *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 33, p. 101953, may 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.101953.





[3] S. Chepyala, M. K. Durgam, V. R. Aenugu, J. Bathula, y S. Bodiga, «Influence of soil nutrients on biomass production and drying methods on citral-rich oil yield from lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* (nees ex steud.) W.Watson) cultivated in Telangana», *Biochem. Syst. Ecol.*, vol. 122, p. 105057, oct. 2025, doi: 10.1016/j.bse.2025.105057.

[4] C. Z. El-Bayeh, A. Badawi, W. Alqaisi, K. Alzareer, y M. Zellagui, «Techno-economic analysis of a solar drying plant using scheffler dish technology and eutectic PCM mixtures for thermal energy storage system», *Energy* 360, vol. 3, p. 100025, jun. 2025, doi: 10.1016/j.energ.2025.100025.

[5] D. D. Fufa, T. Bekele, A. Tamene, y G. Bultosa, «Drying kinetic models, thermodynamics, physicochemical qualities, and bioactive compounds of avocado (*Persea americana* Mill. Hass variety) seeds dried using various drying methods», *Heliyon*, vol. 11, n.º 1, p. e41058, ene. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41058.

[6] «Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials». Accedido: 12 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=82910>

[7] «Relative Humidity Effect on the High-Temperature Drying of Shelled Corn», Accedido: 12 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.13031/2013.37715>





Improvements in restructuring conditions for solar concentration plants based on thermodynamic optimization

GABRIEL VALENCIA-ORTEGA¹, SERGIO LEVARIO-MEDINA²

¹Facultad de Estudios Superiores-Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Estado de México, 53150, Mexico
²Escuela Superior de Cómputo, Instituto Politécnico Nacional, U.P. Zacatenco, CDMX, 07738, Mexico

Corresponding author: G. Valencia-Ortega (e-mail: 903974@pcpuma.acatlan.unam.mx).

This work was fully supported by the SNII-SECIHTI under Grants 508356 and 593870.

ABSTRACT One of the main problems in the design of sustainable concentrated solar power plants is the decorrelation between the energy conversion and the electricity demand. In this work, the fundamentals of thermal energy conversion characteristics are presented within the context of Finite-Time Thermodynamics, on the understanding that all energy conversion processes are finite. Then, based on a radiative-conductive heat engine model, three real-world concentrated solar power plants (Eurelios, Gemasolar, and Ivanpah) are analyzed, studying some of their least dissipative operating modes using a generalized thermodynamic function called k -efficient power, since it leads us to establish general trade-offs between the operating modes and the internal/external design characteristics of these solar generation plants. Therefore, two approaches to achieving optimization are established: The energy reconfiguration process involves improving the thermal storage system for solar plants, while internal design restructuring proposes modifying the heliostat (A_H)/receiver area (A_R) ratios. For example, the receiver area for each plant should be reduced proportionally to its conversion capacity. These optimal processes could be incorporated into future work to characterize and improve plant design in Mexico.

INDEX TERMS Nonequilibrium Thermodynamics, Optimization models, Solar concentrators.

I. INTRODUCTION

In recent years, technological efforts and government policies have focused on gradually moving societies toward sustainable energy production and reducing CO₂ emissions [1]. Environmental degradation caused by economic and industrial activities has prompted the creation of ecological models that link environmental impact to population growth. Therefore, most of these models converge toward various scenarios based on the concept of energy sustainability [2,3], fostering the development and innovation of technologies that utilize alternative, clean sources for energy generation and distribution. The latter could be key to achieving a symbiosis between energy optimization, governed by the laws of thermodynamics, and functional energy-economic methods to increase sustainability.

While it is difficult to find sustainable ways to meet energy needs without harming the environment, solar energy technologies, due to their operation, have achieved a reduction in greenhouse gases. In particular, concentrating solar technologies have gained confidence in the electricity generation market, where the modular effect of solar fields allows them to operate gradually at any power level [4,5]. Furthermore, alternative sources of electricity generation (ASEG) that use solar energy have operating costs independent of fuel price fluctuations, which allows them to supply electricity during peak hours. However, this method of supplying energy to the grid presents some problems, since their operation and design require very specific locations to make their operation profitable. Although some algorithms make correct decisions to improve energy distribution [6,7], few thermodynamic optimization studies





have focused on establishing a balance between optimal design and operating modes [8,9], given that solar energy systems remain energy converters that experience inherent dissipative processes related to entropy production.

In this energy conversion framework, Finite-Time Thermodynamics (FTT) has been dedicated to establishing relationships between some extra-thermodynamic parameters and optimal operating modes. These balances allow us to adjust energy converters under less dissipative conditions. From these premises, the so-called objective functions arise, which express these compromises through different energy conditions, given by various mathematical combinations among the process variables, the dissipation function (Φ), the output power (P), and the efficiency (η). Therefore, it has been possible to demonstrate [10,11] that the optimal regimes described by the objective functions have a direct impact on the design and energy storage capacity of the systems. Therefore, since the optimal operating regimes delimit the energy configuration map for heat engine models, real power plants can reduce their dissipative effects.

The content of this research work is summarized in establishing the thermodynamic model (Müser-Curzon-Ahlborn model) for radiative-conductive heat transport processes occurring in indirect electricity conversion systems (Section II). Using a generalized objective function (k-Efficient Power) defined in the context of the FTT, it is shown that the generalization parameter k uniquely characterizes and limits the capacity of additional thermodynamic parameters in energy configuration curves. In Section III, using the general property of the parameter k , two proposals for sustainable scenarios are established: the first is based on the so-called *energy restructuring conditions* [12], and the last focuses on the introduction of *energy reconfiguration processes*. Finally, in Section IV, we presented our conclusions.

II. THERMODYNAMIC MODEL

In this thermodynamic approach, the models have incorporated the dissipative characteristics of real energy converters [13,14], represented by heat losses. To emulate these losses, we studied radiative-conductive heat transport, as well as those occurring during energy conversion, within tower-type solar concentrating systems (central receivers). We primarily analyzed a combined heat engine model called

the Müser-Curzon-Ahlborn (MCA) engine [8]. As indicated in the flow diagram (Fig. 1), the MCA model represents a field of mirrors (heliostats) that supply sunlight to the central receiver at temperature T_0 , mounted on a tower. The heat is then transferred to a main steam system, which operates between two energy reservoirs at temperatures T_h and T_c , respectively, such that ($T_h > T_c$). In this non-endoreversible thermodynamic scheme, a working fluid is assumed to operate irreversibly between two internal temperatures x and y (where $T_h > x > y > T_c$). This type of irreversibility can be quantified by a non-endoreversible parameter (R) [10], which is bounded as $0 < R \leq 1$. Likewise, thermal conductances (α and β) are usually associated with external dissipative elements of Carnot-type engines. In this work, we assume that two heat transfer laws intervene (Newtonian and Stefan-Boltzmann), given by:

$$\dot{Q}_0 = \sigma \varepsilon A_R (T_0^4 - T_h^4), f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_h = \alpha (T_h - x), f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (2)$$

and

$$\dot{Q}_c = \beta (y - T_c), f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (3)$$

To describe the energy performance of this type of solar plants, it is common to define three thermodynamic functions: power output (P), efficiency (η) and dissipation (Φ), which arise from the first and second laws of thermodynamics, and are given by:

$$P = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c, f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (4)$$

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_h}, f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (5)$$

and

$$\Phi = \dot{Q}_c - \tau_0 \dot{Q}_h, f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}} \quad (6)$$



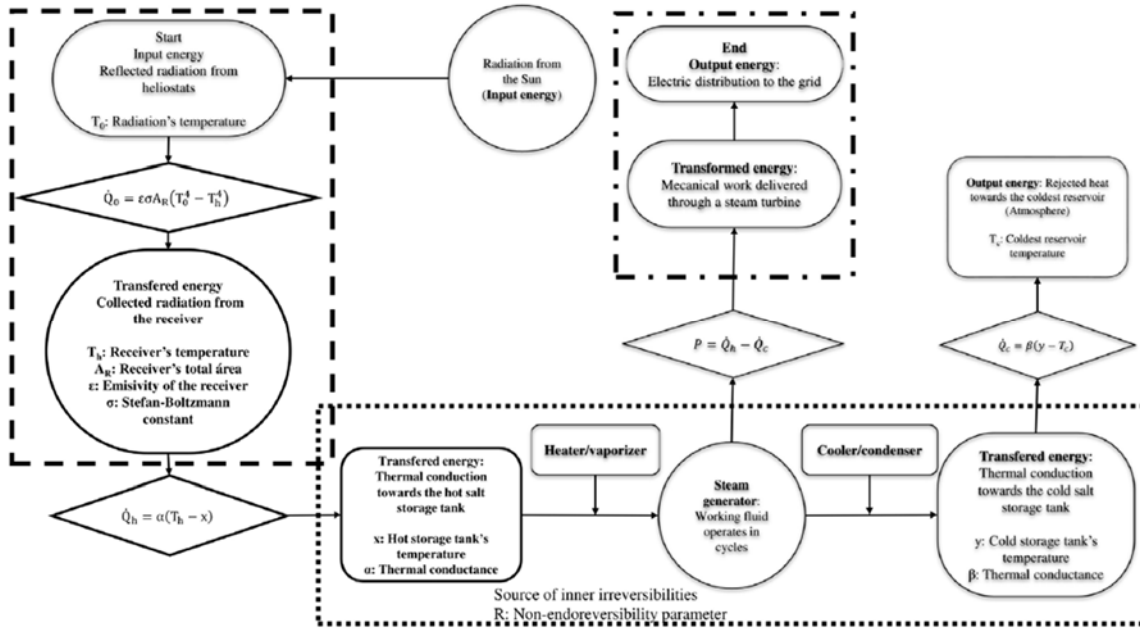


FIGURE 1. Flow diagram expressing heat transfer through radiative and conductive processes within the layout of a tower-type solar power plant. Energy conversion takes place within an irreversible steam generator, and the electrical work produced is delivered to the power grid. The dashed region represents the solar field; the thermal energy storage subsystem is represented by dashed lines, while the power block is represented by dots and lines.

With $\tau_0 = T_c/T_0$. Furthermore, $\Phi = T_c S_T$ and $\dot{S}_T = \dot{S}_e + \dot{S}_i$, where $\dot{S}_e$ is the entropy production of the surroundings and $\dot{S}_i$ is the entropy production of the main engine. Each of these summands can be written as:

$$\dot{S}_e = \frac{\dot{Q}_c}{T_c} - \frac{\dot{Q}_h}{T_0} f(x) = \frac{e^{g x} x - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (7)$$

and

$$\dot{S}_i = \frac{\dot{Q}_h}{x} - \frac{\dot{Q}_c}{y} + \dot{S}_{ws}, f(x) = \frac{e^{g x} x - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (8)$$

where $\dot{S}_{ws}$ represents the entropy production of the working fluid, i.e., it represents internal losses, such as turbulence, friction between the fluid and the walls of the turbine chamber, etc. By using the parameter R as a measure of the irreversibilities of the engine core, and σ_{ws} has the mathematical form [15]:

$$\dot{S}_{ws} = (1 - R) \frac{\dot{Q}_c}{x}, f(x) = \frac{e^{g x} x - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (9)$$

Now, to write the heat flow Eqs 2 and 3, a dimensionless parameter a_h will be used as follows:

$$\dot{Q}_h = \alpha T_h (1 - a_h), f(x) = \frac{e^{g x} x - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (10)$$

and

$$\dot{Q}_c = \frac{\alpha \tau T_h (1 - a_h)}{a_h (R + \gamma) - \gamma}, f(x) = \frac{e^{g x} x - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (11)$$

where $\tau = T_c/T_h$, $\gamma = \alpha/\beta > 0$ and $a_h = x/T_h$ (called high reduced temperature). In this thermodynamic scheme, the so-called process variables are given by Eqs. 4, 5 and 6 can be rewritten in terms of Eqs. 10 and 11 as:

$$P = \alpha T_h \left[1 - a_h + \frac{\tau(1 - a_h)}{\gamma - a_h(R + \gamma)} \right], f(x) = \frac{e^{g x} x - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (12)$$

$$\eta = 1 - \frac{\tau}{a_h(R + \gamma) - \gamma}, f(x) = \frac{e^{g x} x - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (13)$$

and

$$\Phi = \alpha \tau T_h \frac{(1 - a_h)[1 + \gamma - a_h(R + \gamma)]}{a_h(R + \gamma) - \gamma}, f(x) = \frac{e^{g x} x - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (14)$$

By definition, τ and a_h are connected through the following physical constraints,



$$\frac{\gamma + \tau}{R + \gamma} \leq a_h \leq 1, f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (15)$$

with $0 < \tau \leq R < 1$. Therefore, for this MCA model, particular energetic configurations such as those for real heat engines can be specified. An example of such a configuration is outlined in Fig. 2, and two well-defined power operating zones are present. In particular, the MCA model shows that almost all physical output power values for this type of energy converter have two different efficiency values: one in zone ZII is greater than the other in zone ZI. Both zones are separated by the maximum output power (MP) regime, characterized by a_h^{MP} equal to:

$$a_h^{MP} = \frac{\gamma + \sqrt{R\tau}}{R + \gamma} \cdot f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (16)$$

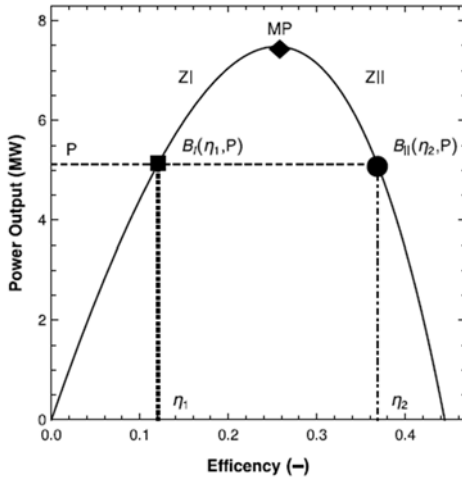


FIGURE 2. Curve between power output (P) vs. efficiency (η) for an arbitrary power plant configuration. The rho (η_2).

Within the FTT framework, other thermodynamic functions (objective functions) have been defined, such as the efficient power ($P_\eta \equiv P\eta$), which, like P , represents an achievable mode of operation. Therefore, several generalizations for this function have been proposed, with the aim of characterizing all operation modes for any energy configuration. Since P_η only depends on the input and output energies for the MCA model, we use the definition of the so-called k -efficient power ($P_{\eta k} = P\eta^k$) [12]. This parameter k not only allows us to analyze the operating modes of some real power plants, but also shows the relationship between the design and operating parameters. That is, the parameter

k allows to determine the quality of the energetic performance of any power plant. Therefore, we show that it is possible to establish some modifications in the design parameters to construct a new configuration curve. In Fig. 3, certain optimal values of a_h can be verified, such that ($MP_{\eta k}$) is equivalent to the maximum power output, maximum efficient power (MP_η) or maximum ecological function (ME_F) regimes.

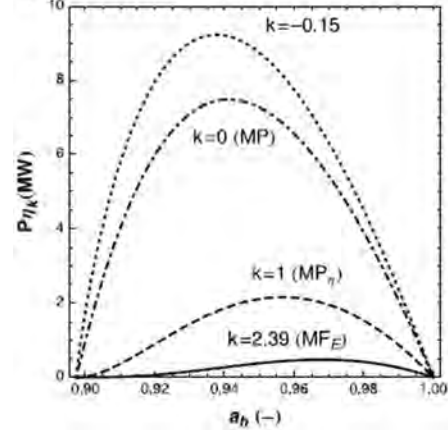


FIGURE 3. Graphic representation of the objective function: power output, efficient power and ecological function which are characterized by: $\alpha = 1 [MW]$, $\gamma = 3[-]$, $\tau = 0.5[-]$, $T_h = 500 [K]$ and $R = 0.9$. Therefore, graph displays four cases of $P_{\eta k}$ function, which correspond to $k = -0.15$, $k = 0$ (MP), $k = 1$ (MP_η) and $k = 2.39$ (ME_F), for fixed values of τ and R .

III. RESULTS AND DISCUSSION

There are several proposals for designing a set of strategies to reduce environmental impact, including improved energy generation technology, as well as environmentally friendly energy processes and increased efficiency. Our analysis focuses on establishing a scenario where energy demand is leveled and environmental impact is reduced, resulting in the minimization of heat emitted into the atmosphere by each energy conversion carried out in solar plants. In other words, we propose sustainability in energy conversion mechanisms.

Table I presents the main data reported for the Eurelios, Gemasolar, and Ivanpah plants [16,17], as well as the values of the configuration parameters (α , γ , and R) that can be obtained by solving Eqs. 12 and 13. The parameters R and α ensure that the current operation of the power plant is within a particular configuration curve. In this model, the parameter γ is considered a tuning parameter, which is convenient because it modulates external dissipation.

TABLE I. Reported and configuration data for three commercial solar tower-plants: Eurelios, Gemasolar and Ivanpah. For the three solar plants,



α , γ , and R remain constants, the entropy production, expressed through the dissipation function, exhibits a decrease in *ZII*.

			Eurelios	Gemasola r	Ivanpah
R e p o r t e d d a t a	E n e r g y	η_0 [-]	0.14	0.17	0.28
		P [MW]	1.1	19.9	48.3
	D	T_h [K]	1148	1486	1988
	e	x [K]	683	838	838
	s	T_c [K]	288	308	308
	i	A_R [m ²]	16	1517	641
C o n f i g u r a t i o n d a t a	g n	A_H [m ²]	6224	306424	173070
	M	γ [-]	0.7	0.7	0.3
	o	α [MW/K]	0.017	0.18	0.15
	d	R [-]	0.97	0.97	0.91
	e l	k_I [-]	-0.93	-0.93	-0.88
		a_h^I [-]	0.595	0.564	0.422
Z I		Φ_I [MW]	4.793	73.747	98.325
		k_{II} [-]	13.25	13.74	7.61
		a_h^{II} [-]	0.919	0.901	0.789
		x_{II} [K]	1054.84	1339.39	1569.84
	Z I	η_{II} [-]	0.69	0.75	0.77
	I	Φ_{II} [MW]	0.081	1.292	5.016

On the other hand, in [12], it has been shown that the physical operation modes in *ZI* can be reached whenever $-1 \leq k < 0$; otherwise, ($k > 0$), the operation mode is in *ZII*. To obtain the values of k that characterize the operation modes reported by the solar concentration plants, we can use a procedure analogous to the one described in [12]. In this case, the efficiency value in $MP_{\eta k}$ can be obtained, through the parameters R , τ and k by:

$$k = \frac{\eta R}{R(1-\eta)-\tau} - \frac{1}{1-\eta} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (17)$$

Table I presents some specific values of k that describe the quality of energy conversion at each power plant and helps us establish conditions for improving its energy efficiency. The quality of energy conversion can be reflected by the parametric curve in the $P - \eta$ space (see Fig. 2). Therefore, the efficiency of solar concentrating plants is expressed as a function of the reported power output (P):

$$\eta_{1,2} = 1 - \frac{P(R+\gamma) + \alpha T_h(R-\tau) \pm r_{1,2}}{2\alpha R T_h} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (18)$$

with

$r_{1,2} = \sqrt{[P(R+\gamma) + \alpha T_h(R-\tau)]^2 - 4\alpha R P T_h(R+\gamma)}$. The subscript 1 is associated with the minus sign and represents the efficiency values in *ZI*, while the subscript 2 is related to the plus sign and represents the efficiency values in *ZII* with the same power output.

Although these types of solar electric energy technologies are an option for improving sunlight conversion efficiency based on an increase in the concentration ratio, several factors, such as weather conditions, intermittency, or internal dissipation losses, represent some of the reasons why the operating points of real solar plants are not necessarily located in *ZII* (see Fig. 2). To demonstrate that the generalization parameter k moves the operating point along the parametric curve P - η to improve the performance of heat engines within a particular configuration, which in turn is specified by the operating parameters P , η , and τ , a set of three commercial plants located in the Northern Hemisphere are considered: Eurelios (Adrano, Italy), Gemasolar (Seville, Spain), and Ivanpah (California, USA). Table I presents the energy configurations that the aforementioned commercial solar plants can experience in each area, maintaining the same reported output power but with a higher efficiency value. It is worth noting that $\Phi_2 < \Phi_1$, and the dissipated energy decreases as a specific restructuring process is achieved.

Since α , γ , R and T_h are fixed for each solar plant, the only parameter that allows improving efficiency with the same power output is the one associated with the "hot" internal thermal storage tank (x). This technical characteristic may involve modifying the heating capacity or searching for another thermal storage technology. From the definition of a_h , we can establish that T_h remains constant for both zones. Therefore, for *ZI* we have: $T_h = x/a_h^I$ and for *ZII*, $T_h = x_{II}/a_h^{II}$. This would involve obtaining a subsystem with high thermal capacity. On the other hand, if the interest lies in modifying the design of the solar fields (heliostats and/or receivers), a new configuration must be found that contains the reported operating mode. This involves meeting a new set of configuration parameters, as well as the temperature (T_h and, therefore, τ), through a reconfiguration process.

The mathematical expression for $a_h^{MP_{\eta k}} = 2\gamma - k\tau r_k \sqrt{\tau} / [2(R+\gamma)]$, is substituted into Eqs. 12 and 13, we can find the values of γ^* and τ^* that describe the particular k -configurations, after solving both equations simultaneously (see Table II). In particular, the MP , MP_{η} and ME_F regimes can be achieved. Within this energy restructuring scheme, the temperature of the hot thermal storage (x) is now fixed and since the parameter τ^* is known, the new parameter T_h^*





can be determined by means of the relation: $T_h^* = T_c/\tau^*$, where T_c is the value reported in Table I for each concentrating solar power plant. Furthermore, to ensure that the new configuration corresponds to the operation of a heat engine, the thermal conductance values α^* are limited by a single value that depends on each operating regime (see the fourth row of Table II). The main characteristic of energy conversion in this type of solar power plant lies in the ability

to concentrate and store solar radiation in secondary systems. Therefore, this thermodynamic scheme allows the receiver and heliostat areas to be adjusted according to maximum energy availability and the desired performance regime. Incident radiation is artificially increased by the concentration factor (C), which is geometrically defined as the ratio of the heliostat and receiver areas, $C = A_H/A_R$.

TABLE II. Mathematical expressions for the configuration parameters (α and γ), as well as for the control parameter τ , assuming a fixed value of R . The new parameters depend on the reported power output and efficiency values of each solar plant. Here $r_{FE} = \sqrt{1 + 8(1 - \eta)^2}$.

Parameters	Regimes		
	MP	MP _{η}	ME _F
$\tau^* [-]$	$R(1 - \eta)^2$	$\frac{2R(1 - \eta)}{(1 - \eta)}$	$\frac{r_{FE} - 1}{\eta}$
$\gamma^* [-]$	$R \left(\frac{\alpha T_h \eta^2}{P} - 1 \right)$	$R \left(\frac{\alpha T_h \eta^2}{P(2 - \eta)} - 1 \right)$	$R \left[\frac{\alpha \eta T_h (4\eta - 3 + r_{FE})}{P(1 + r_{FE}) - 1} \right]$
$\alpha^* [MW/K]$	$\left(\frac{P}{\eta^2 T_h} \right) < \alpha$	$\left(\frac{2P(1 - \eta)}{\eta^2 T_h} \right) < \alpha$	$\left[\frac{P(r_{FE} - 1 - 2R(1 - \eta))}{\eta^2 T_h (1 - \eta(2 - R) - R)} \right] < \alpha$

Similarly, from the total incident energy for an MCA model, the concentration factor can be estimated by the relationship between the effective temperature of the atmosphere and the mean temperature of the catchment area,

$$C \approx \frac{1}{4} \left[\left(\frac{T_h^4}{T_c^4} + \frac{Q_h}{\sigma \varepsilon A_R T_c^4} \right) - 1 \right] f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (19)$$

where σ is the Stefan-Boltzmann constant and ε is the emissivity constant. Heliostats used in solar fields have an approximate value of $\varepsilon \approx 0.93$ [16].

Within our energy reconfiguration framework, both the reported and symmetric operating modes with the same output power and higher efficiency can be associated with the MP, MP _{η} , and ME_F operating modes, as shown in Fig. 3. That is, two different energy curves are described for each performance regime; therefore, the heliostat or receiver areas can be modified using the concentration parameter. In this way, there are two options: maintaining the receiver area and modifying that of the heliostats or conserving the heliostat area and changing that of the receiver. The first option is profitable for solar plants operating in *ZI*, because reducing the heliostat area leads to a decreased ecological and economic impact, unlike the second option, where rebuilding the tower would entail interrupting the electricity supply to the grid.

However, when looking for a new solar plant design in the *ZII*, the second option is more suitable for the new sustainable energy perspectives, since reducing the receiver

area would imply less material usage, unlike the first option, which requires an increase in the heliostat area. Fig. 3 shows the typical values for heliostat area reduction for solar plant operation in *ZI*, as well as the values for receiver area reduction for solar concentrating devices operating in *ZII*.

This thermodynamic approach allows for establishing equilibrium conditions to improve solar energy conversion performance, taking into account design characteristics. These energy strategies can thus be implemented to improve the green trend and promote sustainable energy consumption.

IV. CONCLUSIONS

The current energy production landscape focuses on establishing a balance between increasing thermal efficiency and reducing environmental impact. This balance is often a good qualitative measure for maintaining optimal energy sustainability. Since energy consumption varies by sector and is influenced by human activities, it is necessary to understand the seasonal peak power conditions that can be generated specifically with indirect solar energy technologies.

Based on a combined thermodynamic model (radiation-conduction), it is possible to establish physical constraints for the design variables (γ , a_h , and α), which allow solar energy converters to operate in the optimal operating regimes mentioned above, improving their energy efficiency through restructuring processes or reconfiguration conditions. The optimization processes analyzed here could



allow us to find conditions to reduce the ecological impact when refurbishment and decommissioning costs are applied. Refurbishment costs open the possibility of implementing a

small number of heliostats in limited available areas, thus increasing the sustainability of this type of concentrated solar power plants.

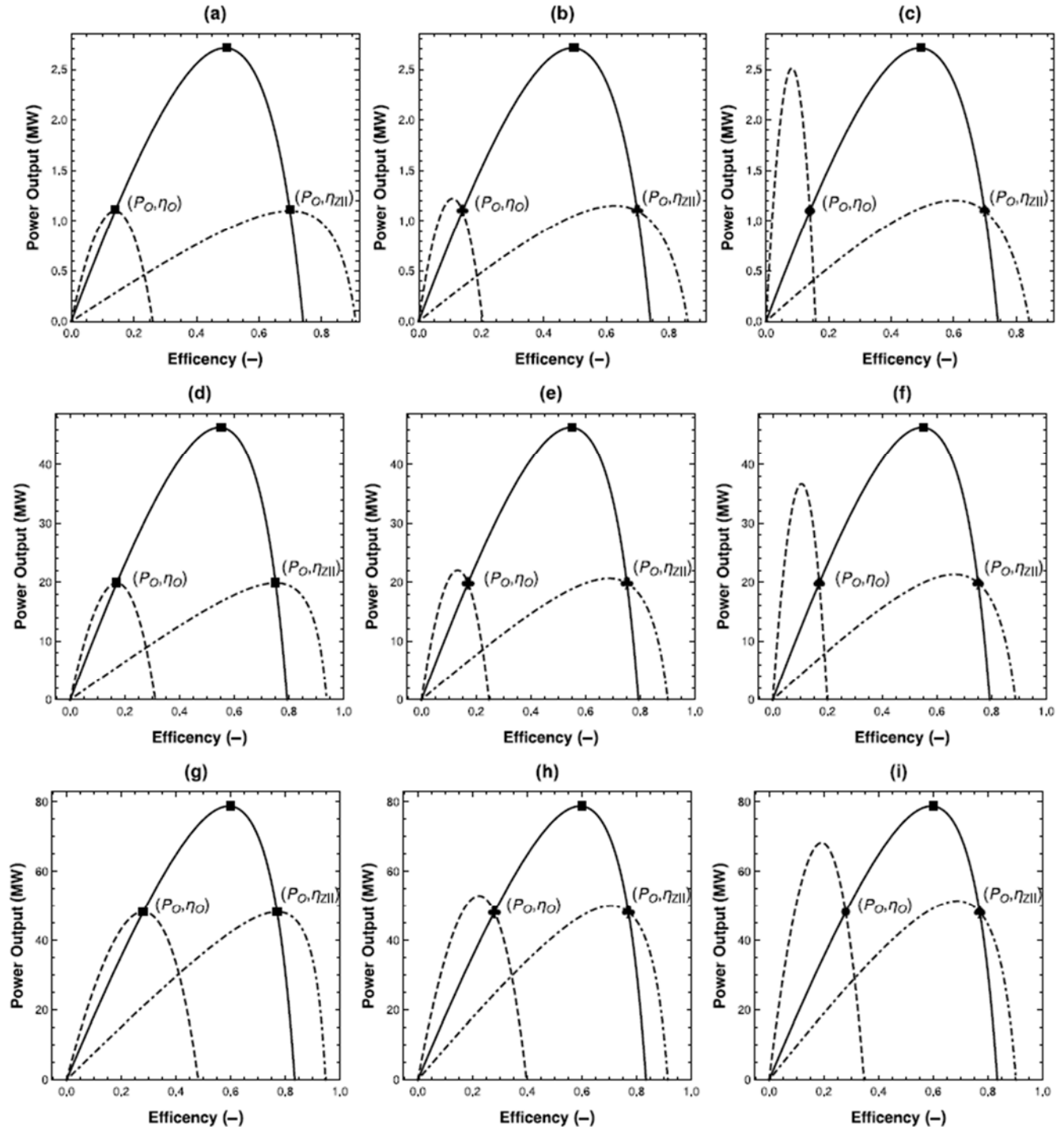




FIGURE 4. Energetic configuration curves for the three heliothermal power plants (Eurelios in first line, Gemasolar in second line and Ivanpah in third line). Solid lines are sketched by taking the data reported in Table 1, dashed lines correspond to the energetic reconfiguration where the reported operation mode represent the regimes: **MP** (square mark), **MP_η** (clover mark) and the **ME_F** (spade mark). Likewise, dot-dashed lines represent reconfiguration curves with the same reported power output by each solar plant, the operation points represent the same performance regimes (**MP**, **MP_η** and **ME_F**).

While the proposed model is a first approximation to what happens during the operation of indirect concentrating solar converters, this study could encourage the use of new thermal storage technologies or lead us to redesign the effective area for heliostats and receiver towers, according to the methodology presented in Section III. Therefore, this type of solar energy converters could be more in line with current sustainability policies while reasonably fulfilling energy demand. Considering the optimization of the receivers' area, as well as the thermal storage tank, which agrees with the proposal of the total annual cost of concentrating solar systems, which is a function of the solar collectors' area (A_R) and the annual useful energy collected and delivered to the prime mover ($\dot{Q}_h$). Therefore, our optimization analysis would allow establishing a general guideline for making internal improvements and external geometric modifications without wasting resources.

REFERENCES

- [1]. Panwar NL, Shrirame HY and Bamniya BR, *CO₂ mitigation potential from biodiesel of castor seed oil in Indian context*. Clean Technol Environ Policy 12:579–582 (2010). 10.1007/s10098-009-0269-5.
- [2]. Dietz T and Rosa EA, *Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology*. Hum Ecol Rev 1:277–300 (1994). www.jstor.org/stable/24706840.
- [3]. Lozano S and Gutiérrez E, *Non-parametric frontier approach to modelling the relationships among population, GDP, energy consumption and CO₂ emissions*. Ecol Econ 66:687–699 (2008). 10.1016/j.ecolecon.2007.11.003.
- [4]. Mills D, *Advances in solar thermal electricity technology*. Sol Energy 76(1–3):19–31 (2004). 10.1016/S0038-092X(03)00102-6.
- [5]. Badran O, Mamlook R and Abdulhadi E, *Toward clean environment: evaluation of solar electric power technologies using fuzzy logic*. Clean Techn Environ Policy 14:357–367 (2012). 10.1007/s10098-011-0407-8.
- [6]. Mamlook R, *Fuzzy set methodology for evaluating alternatives to compare between different power production systems*. J Appl Sci 6(9):1686–1691 (2006). 10.3923/jas.2006.2117.2125.
- [7]. Mamlook R and Badran O, *Fuzzy sets implementation for the evaluation of factors affecting solar still production*. Desalination 203(1–3):394–402 (2006). 10.1016/j.desal.2006.02.024.
- [8]. Navarrete-González TD, Rocha-Martínez JA and Angulo-Brown F, *Müser-Curzon-Ahlborn engine model for photothermal conversion*. J Phys D: Appl Phys 30:2490–2496 (1997). 10.1088/0022-3727/30/17/016.
- [9]. Jadhav IB, Bose M and Bandyopadhyay, S, *Optimization of solar thermal systems with a thermocline storage tank*. Clean Techn Environ Policy 22:1069–1084 (2020). 10.1007/s10098-020-01849-4.
- [10]. Levario-Medina S, Valencia-Ortega G and Barranco-Jiménez MA, *Energetic Optimization Considering a Generalization of the Ecological Criterion in Traditional Simple-Cycle and Combined-Cycle Power Plants*. J Non-Equilib Thermodyn 45:269–290 (2020). 10.1515/jnet-2019-0088.
- [11]. Angulo-Brown F, *An ecological optimization criterion for finite-time heat engines*. J Appl Phys 69:7465–7469 (1991). 10.1063/1.347562.
- [12]. Levario-Medina S, Valencia-Ortega G and Arias-Hernandez LA, *Thermal optimization of Curzon-Ahlborn heat engines operating under some generalized efficient power regimes*. Eur Phys J Plus 134:348 (2019). 10.1140/epjp/i2019-12711-2.
- [13]. Sieniutycz S and Salamon P, (1990) *Finite Time Thermodynamics and Thermoeconomics*, Taylor and Francis, 1st Edition (1990). ISBN-13: 978-0844816685.
- [14]. Wu C, Chen L and Chen J, *Recent Advances in Finite Time Thermodynamics*, Nova Science, 1st Edition (1999). ISBN-13: 978-1560726647.
- [15]. Chen J, Yan Z, Lin G and Andresen B, *On the Curzon-Ahlborn efficiency and its connection with the efficiencies of real heat engines*. Energy Convers Manag 42:173–181 (2001). 10.1016/S0196-8904(00)00055-8.
- [16]. Gretz J. “EURELIOS, the world’s first thermomechanical helioelectric power plant”. Endeavour 6:34–39 (1982). 10.1016/0160-9327(82)90008-4.
- [17]. Burgaleta JJ, Arias S and Ramirez D. *Gemasolar, The First Tower Thermosolar Commercial Plant with Molten Salt Storage*. In Proc. 17th Concentrating solar power and chemical energy systems conference, 2011, pp 1–8.





Aspectos importantes en la obtención de diésel renovable usando un enfoque de co-hidrotratamiento

J. CARLOS CÁRDENAS GUERRA*, F. ALONSO MARTÍNEZ, PATRICIA RAYO,
G. MARROQUÍN SÁNCHEZ, JOSÉ A.D. MUÑOZ MOYA

Instituto Mexicano del Petróleo, Gerencia de Tecnologías de Transformación de Hidrocarburos, CDMX, 07730, México

Autor de Correspondencia: J. Carlos Cárdenas Guerra (e-mail: carlogs@yahoo.com)

RESUMEN La comunidad científica se ha enfocado en desarrollar tecnologías alternas para la producción de energía donde no se involucre el consumo desmedido de combustibles fósiles. Entre las opciones que mayor interés han recibido se encuentra el uso de los biocombustibles, de los cuales el biodiésel ha sido considerado como uno de los recursos promisorios para la sustitución del diésel derivado del petróleo. Sin embargo, la obtención de biodiésel involucra altos costos de operación, así como un incremento en la inversión de capital del proceso; además, dicho bioenergético está constituido por una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos, los cuales ocasionan problemas en el motor diésel debido a: (i) alto contenido de oxígeno, (ii) alta viscosidad (causada por la acumulación de depósitos y la coquización de los inyectores como resultado de una atomización inadecuada durante la inyección en la cámara de combustión), (iii) alta reactividad en las cadenas de hidrocarburos insaturados, y (iv) alto punto de ebullición, mismo que eleva el consumo de energía. Por otro lado, las hidrodesulfuradoras de las refinerías actuales se encuentran cumpliendo las especificaciones establecidas a nivel mundial para producir un combustible verde. Este hecho, a su vez, ha considerado una configuración tecnológica aplicando los conceptos de biocombustibles de reemplazo directo, donde se aborda el procesamiento de fuentes de biomasa en un proceso de refinación permitiendo aprovechar la infraestructura de sus instalaciones. Por ello, el presente trabajo revisa varios factores sobre la factibilidad técnica del co-hidrotratamiento, con el objetivo de lograr una comprensión de los efectos que implican el tipo de materia

prima de origen biológico, los catalizadores empleados, las condiciones de operación y la calidad del producto.

PALABRAS CLAVE: Diésel renovable, aceite vegetal, fracciones del petróleo, co-hidrotratamiento.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, tanto el crecimiento poblacional como la variación de hábitos en la actividad humana (resultado del desarrollo tecnológico), han ocasionado un aumento en la demanda global de energía y consecuentemente en el cambio climático del planeta. Cada año, la revisión estadística de British Petroleum (BP) en Energía Mundial "BP Statistical Review of World Energy" ha reportado que durante los últimos veinte años se ha elevado el consumo de energía en 50% a nivel mundial – para México el incremento fue del 67% [1]. Aunado a lo anterior, el problema se intensifica debido a la dependencia por los hidrocarburos, su eminente escasez y el aporte que tienen a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Esto ha generado una gran preocupación alrededor del mundo por el acelerado deterioro en la calidad del aire, misma que ha forzado a que los países industrializados contemplen acuerdos importantes para mitigar el cambio climático. Un ejemplo de ello ha sido la Conferencia de las Partes (COP, por sus siglas en inglés), la cual tiene como finalidad analizar los avances del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En la COP26 celebrada en Glasgow (2021), los gobiernos de los países miembros reafirmaron el objetivo del Acuerdo de





París (COP21, 2015) por establecer reducciones severas de emisiones de GEI para evitar un calentamiento del planeta superior a 2°C.

Por su parte, México se ha comprometido a colaborar en equipo con otros países para frenar la degradación del planeta a fin de lograr los objetivos del tratado internacional de la COP21. Desde esta perspectiva, la comunidad científica ha creado y apoyado proyectos de investigación con miras a incrementar la competitividad del combustible mexicano en el mercado internacional. No obstante, PEMEX ha señalado que para alcanzar dichos objetivos, primero se debe desulfurar la totalidad de los gasóleos producidos en las refinerías, lo cual requiere la modernización de sus unidades en la sección de reacción; esto implica redoblar esfuerzos en la formulación de catalizadores más activos y selectivos, modificación de los internos del reactor para permitir una reacción más eficiente, o bien el mejoramiento de las condiciones operacionales de las tecnologías de hidrotratamiento (HDT).

Por otro lado, se han realizado grandes avances en el aprovechamiento de biomasa a partir de fuentes renovables. En esta dirección, los biocombustibles se han incorporado a la matriz energética como combustibles líquidos alternativos asumiendo como meta inicial la sustitución parcial de los combustibles fósiles. De esta manera, procesar lípidos [como triglicéridos (aceites vegetales comestibles y no comestibles), ácidos grasos libres y residuos orgánicos] podría generar un combustible limpio por medio de un esquema de refinación. El fundamento de esta transformación es la hidrodesoxigenación (HDO) con el propósito de eliminar un alto contenido de oxígeno a través de diferentes rutas de reacción.

Con la aplicación de normas ecológicas, es un hecho que la situación actual de los combustibles convencionales ha tomado un nuevo giro hacia la introducción de procesos más amigables con el medio ambiente; sin embargo, su implementación industrial por obtener combustibles de bajo contenido de carbono puede verse restringida porque requiere una planificación integral que considere la disponibilidad de materias primas (tipo, origen y ubicación estratégica de la biomasa), el exceso de H₂ empleado, el escalamiento del diseño conceptual del proceso, la inversión de capital asociada con su instalación, y la distribución comercial de los recursos (costos de transporte) a lo largo de toda una cadena de suministro [2]. Una forma de minimizar estas limitaciones técnico-económicas es la adaptación del HDT con fracciones del petróleo; en consecuencia, el denominado co-hidrotratamiento (co-HDT) tendrá un

impacto significativo en la operabilidad de las actuales plantas comerciales de HDT. Por lo tanto, en este trabajo se presenta un estudio de investigación del co-HDT de aceites vegetales con cargas de hidrocarburos fósiles para la producción de diésel renovable. Se destacan aspectos relevantes como el efecto de las condiciones de operación sobre la remoción de azufre, la influencia del tipo de catalizador, el tipo de materia prima de origen biológico y la calidad del producto.

2. EL CONCEPTO DEL Co-HDT

Existen dos esquemas de HDT para producir un combustible renovable y económicamente competitivo (Figura 1). El primero de ellos muestra el procesamiento autónomo, mientras que la segunda configuración incluye el co-HDT [3-7]. Los procesos de HDT autónomos son una tecnología que transforma el material de origen orgánico en bioproductos líquidos hidrogenados por HDO, que posteriormente pueden mezclarse con el petrodiesel para cumplir las políticas ambientales; después, se requiere un proceso complementario donde el combustible se somete a una isomerización para producir iso-alcanos [8-10]. En el esquema de co-HDT, las materias primas de biomasa y las fracciones del petróleo reaccionan simultáneamente en la misma unidad existente de HDT, generando compuestos alifáticos renovables e insertando su producción de manera natural en los objetivos de descarbonización hacia el sector transporte [2-3, 11-13]. Esta integración ofrece la ventaja de aprovechar la infraestructura de sus instalaciones, lo que conlleva a una reducción de inversión de capital y de costos de operación al ser eliminado un equipo de proceso.

2.1. El sistema reactivo

La conversión de triglicéridos presentes en un aceite vegetal procede a través de diversas etapas [14-16], las cuales gradualmente llevan a la obtención de hidrocarburos alifáticos. Como primera etapa, la molécula de un triglicérido se hidrogena; esto es, la saturación de los dobles enlaces en los ácidos grasos que constituyen al triglicérido. La segunda etapa es la ruptura de dicho tri-éster de glicerol hidrogenado, es decir, la separación de los ácidos grasos del esqueleto del glicerol para así formar C₃H₈ y tres moléculas de ácidos grasos libres. Luego, los ácidos grasos sufren una descarboxilación (DCO₂), descarbonilación (DCO) y desoxigenación (DO), removiendo el oxígeno en forma de CO₂, CO y H₂O (Figura 2).



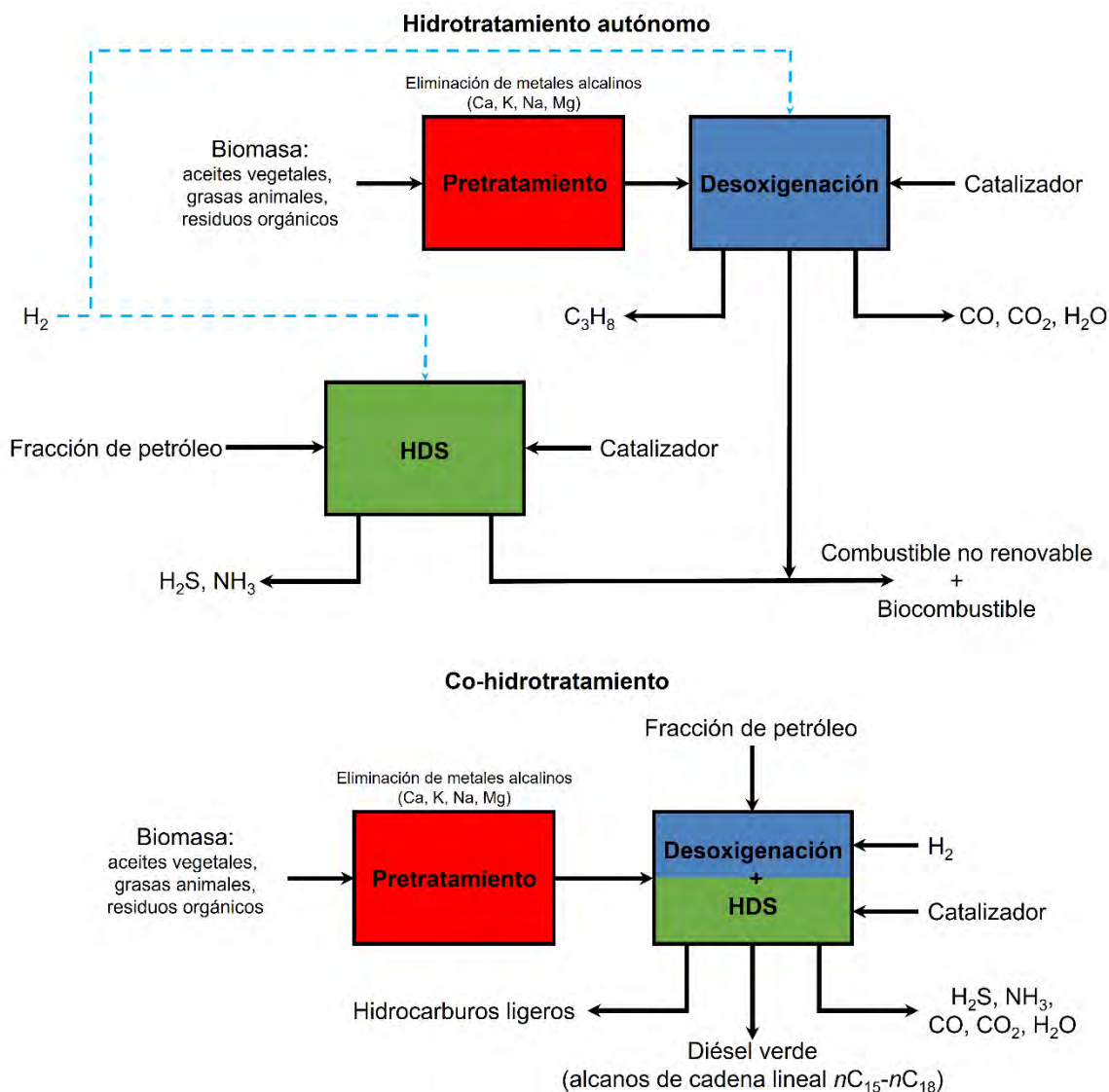


FIGURA 1. Esquemas de HDT para la producción de diésel renovable

Además del subproducto C_3H_8 , el producto final son hidrocarburos de cadena lineal con el mismo número de carbonos que el ácido graso original (reacción de DO) o se acota la cadena del ácido graso que originó el hidrocarburo lineal (reacciones de DCO_2 y DCO), esto significa, que se tiene un número impar de carbonos en su estructura molecular. De esta manera, el diésel renovable (aceite vegetal hidrotratado o diésel verde) comprende un número de carbonos entre $nC_{14}-nC_{25}$ dependiendo del aceite vegetal o grasa animal de origen (Tabla 1). El cambio a productos

renovables puede disminuir la huella de carbono significativamente de 75 a 95% sobre el ciclo de vida del combustible. Los gases ligeros (CO , CO_2 y H_2O) formados afectan al catalizador bloqueando de forma temporal algunos de sus sitios activos y disminuyendo ligeramente su actividad en el procesamiento del aceite vegetal [17]. Los catalizadores empleados en la HDO son sulfuros bimetalicos de molibdeno (Mo) o tungsteno (W) soportados en alúmina, y con níquel (Ni) o cobalto (Co) como promotores (Figura 3).

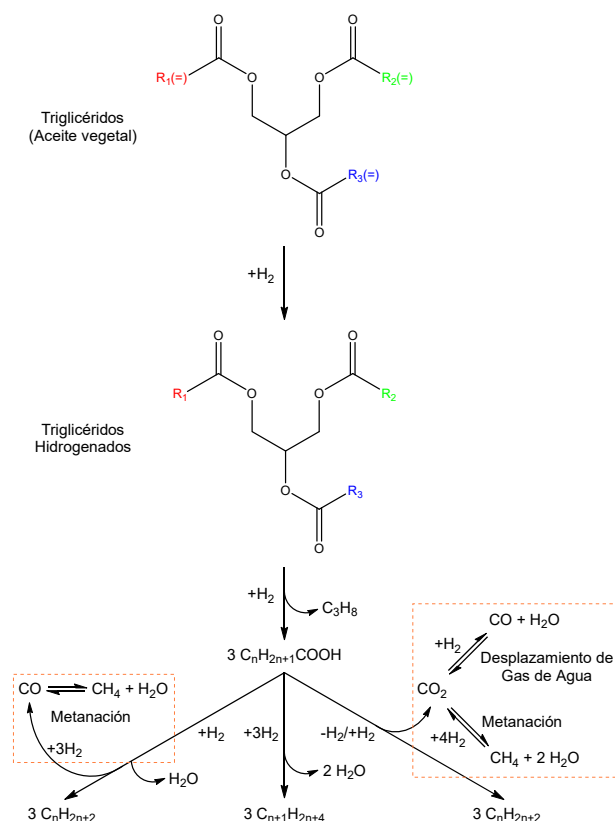


FIGURA 2. Rutas de reacción para la HDO de triglicéridos

El desarrollo de nuevos materiales incluye alteraciones a las fases activas (generalmente con base en Co-Mo-S o Ni-Mo-S) mediante diversos aditivos o modificaciones a la estructura y textura de los soportes comerciales [18]. A nivel fundamental, el universo de materiales evaluados para estas reacciones incluye los sulfuros de diferentes metales de transición, carburos, nitruros o fosfuros como nuevos componentes activos [18]; mientras que, los materiales considerados como potenciales sustitutos de la alúmina comprenden zeolitas, tamices mesoporosos y óxidos metálicos como $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ [18].

Los catalizadores del tipo NiMo/ Al_2O_3 y CoMo/ Al_2O_3 son empleados en la HDS de destilados intermedios para la remoción de azufre y pueden ser aptos para su aplicación en la HDO de triglicéridos [19].

2.2. Metodologías experimentales

En la literatura abierta existe información disponible sobre el co-HDT. Algunos de ellos, han evaluado fracciones de crudo (gasóleo pesado atmosférico, gasóleo pesado de vacío,

gasóleo ligero atmosférico) con aceites vegetales (soya, algodón, palma, canola, girasol) o residuos orgánicos de restaurantes y grasas animales de rastros municipales. Una recopilación de distintas investigaciones con indicadores clave en el co-HDT se muestra en el apéndice A.

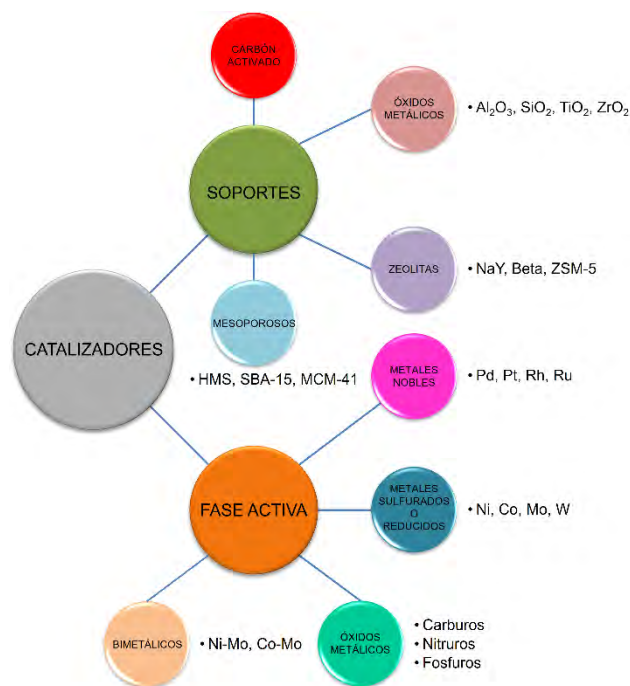


FIGURA 3. Metales activos y soportes comerciales utilizados en la obtención de diésel verde mediante HDO por catálisis heterogénea

TABLA 1. Composición típica de aceites vegetales (% peso)

Compuesto	Canola	Soya	Palma	Jatropha
Ácido láurico (C12:0)	0.00	0.00	0.10	0.00
Ácido mirístico (C14:0)	0.00	0.08	0.70	0.00
Ácido palmítico (C16:0)	3.65	10.98	36.70	15.90
Ácido palmitoleico (C16:1)	0.18	0.11	0.10	0.90
Ácido esteárico (C18:0)	1.65	4.39	6.60	6.90
Ácido oleico (C18:1)	63.72	23.98	46.10	41.00
Ácido linoleico (C18:2)	15.42	52.56	8.60	34.80
Ácido linolénico (C18:3)	14.28	6.76	0.30	0.30
Ácido araquídico (C20:0)	0.00	0.43	0.40	0.00
Ácido eicosenoico (C20:1)	1.10	0.22	0.20	0.20
Ácido behénico (C22:0)	0.00	0.49	0.20	0.00

Uno de los primeros trabajos en reportar experimentación fue Huber et al. [14], quienes, mediante un HDT de aceite de girasol en presencia o ausencia de gasóleo pesado de vacío (GPV), lograron una conversión total del aceite vegetal. El proceso se llevó a cabo en un reactor de lecho fijo empleando un catalizador de NiMo/ Al_2O_3 ; asimismo, las condiciones de



operación se establecieron en un intervalo de 350-450°C, presión de 5 MPa, espacio velocidad (LHSV, Liquid Hourly Space Velocity, por sus siglas en inglés) de 4.97 h⁻¹ y una relación H₂/carga de 1600 mL/mL H₂. Adicionalmente, se demostró que la dilución del aceite vegetal con gasóleo (mezclas con 5% peso de aceite de girasol y 95% peso de gasóleo) incrementa el rendimiento de los alcanos de cadena lineal; incluso, la adición de aceite de girasol no inhibe la velocidad de hidrodesulfuración (HDS).

Sebos et al. [20] estudiaron el co-HDT de un diésel desulfurado con aceite de semilla de algodón. La conversión de moléculas de hidrocarburos compatibles (ésteres) fue determinada en los intervalos de temperatura de 305-345°C y espacio velocidad (WHSV, Weight Hourly Space Velocity, por sus siglas en inglés) de 5-25 h⁻¹. Las pruebas a escala laboratorio se desarrollaron en un reactor de lecho escurrido cargado con CoMo/Al₂O₃ a 3 MPa. De los resultados obtenidos se destaca que la mezcla con 10% peso de aceite de semilla de algodón en el diésel, incrementa tres veces más el número de cetano en comparación con el diésel de ultra bajo azufre (DUBA); esto es, la obtención de un producto renovable de alta calidad.

Vonortas et al. [21] investigaron el HDT de aceite de palma (AP) con gasóleo pesado atmosférico (GPA). Para ello, en un reactor isotérmico de lecho empacado a escala de banco y utilizando un catalizador comercial NiMo/Al₂O₃ se realizó una serie de experimentos a 330, 350 y 365°C con una presión de 3.3 MPa. Se evaluaron flujos de carga (34, 40, 56 g/h) con valores de espacio velocidad (WHSV) de 0.85, 1 y 1.4 h⁻¹ respectivamente; mientras que, el flujo de H₂ fresco se mantuvo constante (19-20 NL/h). La carga consistió en GPA puro y mezclas de 5 y 10% en peso de AP en GPA. Por otro lado, Chen et al. [22] desarrollaron experimentos de mezclas de aceite de canola (AC) y GPV a tres diferentes relaciones de carga AC/GPV (5/95, 10/90, 20/80% peso) en condiciones de HDT [360-395°C, 8-11 MPa, 1-2.5 h⁻¹ (LHSV), 800 NL/L] utilizando un catalizador de NiMo/Al₂O₃.

2.3. Tecnologías comerciales: Haldor Topsoe

Esta compañía observó ciertos inconvenientes operacionales de una planta piloto para la mezcla de 25% vol. de aceite de colza (ACZA) y 75% vol. de gasóleo atmosférico ligero (GLA) obtenido por destilación primaria. Debido a que las reacciones involucradas fueron altamente exotérmicas, la temperatura de la unidad experimental se incrementó rápidamente y la presión parcial de H₂ en los sitios activos de la superficie del catalizador, fue bastante baja causando

que el lecho catalítico se sobrecalentara dando lugar a la desactivación del catalizador por la formación de coque; al mismo tiempo, se produjo una alta caída de presión por el taponamiento del catalizador. Bajo este escenario operativo [350°C, 4.5 MPa, 1.5 h⁻¹ (LHSV), 500 NL/L y catalizador de HDS: NiMo/Al₂O₃] se elaboraron dos nuevos catalizadores (TK-339 y TK-341) para la HDO y HDS [30].

Haldor Topsoe diseñó su tecnología HydroFlex™, la cual está conformada por tres tipos de hidroprocesamiento [31]. El primero es un reactor de HDO que opera entre 250 y 350°C en el intervalo de 2-10 MPa con un espacio velocidad (LHSV) entre 0.1 a 10 h⁻¹ y relaciones H₂/carga de 200-300 NL/L. La carga es una mezcla de ACZA (15% vol.) y GLA (85% vol.). El reactor de HDO cuenta con varios lechos de catalizador TK-339, esto es, Mo soportado sobre alúmina con una estructura porosa bimodal, donde se alcanza una conversión del 70% de la materia prima [31]. Ya que el catalizador empleado en el proceso de HDO tiene una baja actividad de desulfuración, es necesario hidrotratar el efluente para obtener un producto que cumpla los estándares de calidad. Esto se resuelve con la introducción de un segundo reactor de alta presión (P > 20 MPa) que opere en un intervalo de 200-500°C y relaciones H₂/carga de 200-300 NL/L. El reactor de HDT se carga con el catalizador TK-341 (por ejemplo, NiMo/Al₂O₃, CoMo/Al₂O₃ o NiW/Al₂O₃) para convertir la materia prima restante en parafinas de cadena lineal [31]. Posteriormente, un proceso de isomerización (tercer reactor) puede suceder entre 200 y 500°C, y presiones mayores de 20 MPa usando el catalizador TK-928 formulado y soportado de 3% peso de zeolita BEA, 20% peso de Al₂O₃ y 77% peso de SiO₂-Al₂O₃ [31].

2.4. Diseño conceptual

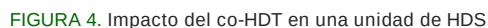
Cuando se procesan lípidos y destilados intermedios en una planta de co-HDT (Figura 4), algunas operaciones unitarias pueden presentar problemas operativos., cuyos aspectos técnicos se abordan a continuación:

- Es esencial una etapa de pretratamiento para retirar las impurezas (fósforo y metales alcalinos: Ca, K, Na, Mg) que contienen los aceites vegetales. Estas impurezas pueden provocar taponamiento o envenenamiento de los sitios activos de los catalizadores acelerando su desactivación y reduciendo su vida útil debido al depósito de carbón en la superficie del catalizador. Para que un aceite vegetal sea hidrotratado es indispensable reducir el contenido de fósforo a concentraciones inferiores de 3 ppm. El proceso de limpieza varía



- El dispositivo interno del reactor puede mejorar la distribución del líquido, de tal forma que se maximiza el contacto gas-líquido-sólido. La eficiencia del plato distribuidor es un factor importante para incrementar la conversión de las reacciones de HDO y HDS, por lo que una buena selección evitará canalizaciones y la formación de puntos calientes a lo largo del reactor. Cabe señalar, que el estudio hidrodinámico por dinámica computacional de fluidos permitirá obtener patrones de flujo y eficiencia de mojado que mejora la actividad catalítica. Estos parámetros también ayudan a una mejor decisión del plato distribuidor.

- Aplicación de catalizadores y arreglos de multi-lechos. La idea de estas alternativas en el diseño de un reactor de HDT es la combinación de múltiples camas catalíticas con diferentes catalizadores y relaciones de H_2 /carga. Por ejemplo, el lecho inferior puede cargarse con catalizador $NiMo/Al_2O_3$ (mayor actividad a altas temperaturas y promueve la hidrogenación con altas presiones parciales de H_2) y la superior con $CoMo/Al_2O_3$ (mayor actividad a bajas temperaturas y promueve la desulfuración directa).
- Se esperan reacciones muy exotérmicas que pueden provocar deterioro al catalizador, así como temperaturas incontrolables de reacción. Por lo que es recomendable analizar la integración térmica de corrientes de quench (apagado) entre los lechos catalíticos para controlar el perfil de temperatura a lo largo del reactor. En otros casos se emplean intercambiadores de calor entre los lechos catalíticos con el mismo propósito. Un balance energético en el reactor será necesario para definir el número de camas catalíticas y corrientes de quench.





- Identificación de los principales equipos de proceso para recomendar nuevos materiales metalúrgicos que minimicen el mayor daño por corrosión provocado por la formación de H_2O , CO , CO_2 y ácidos orgánicos.
- Aplicación de herramientas de integración de energía con la finalidad de aprovechar el calor liberado de las reacciones exotérmicas.
- Evaluación de la planta de reformación catalítica para la producción de H_2 y garantizar el flujo de reposición y pureza requeridos en el proceso. Para ello, se llevará a cabo un balance de hidrógeno en la refinería con la posible adición de una planta de producción de H_2 . La recirculación del exceso de hidrógeno al reactor será tratada en un equipo de lavado con disolventes a base de aminas para remover el CO_2 .
- El diseño de la sección de fraccionamiento puede variar desde una columna hasta una secuencia de destilación de dos torres que separen por temperaturas de ebullición los hidrocarburos ligeros, nafta y diésel renovable. La Intensificación de Procesos, a través de esquemas de separación eficientes en los trenes de destilación, permitirá reducir los costos de operación mediante la minimización del consumo de energía.
- El análisis también puede contemplar el CO_2 en todo el co-HDT, el cual puede ser tratado para su captura y almacenamiento.

2.5. Calidad del producto

Para mostrar el desempeño del co-HDT en términos de la calidad del producto es necesario lograr sus propiedades de flujo en frío. Considerando esto, la Tabla 2 muestra una comparativa de propiedades fisicoquímicas entre DUBA y diésel renovable; también, se puede observar que las propiedades de diésel renovable son muy similares a las obtenidas por plantas comerciales [32-35].

2.6. Desafío económico

El diésel renovable enfrenta un desafío económico considerable ya que su costo de producción es generalmente más elevado que el diésel derivado del petróleo. Esta disparidad se debe, principalmente, a los altos precios de los aceites vegetales, que constituyen la materia prima más costosa en el co-HDT. A diferencia del petróleo crudo, que se extrae a gran escala y tiene un mercado global establecido, la agricultura para aceites vegetales es un proceso más intensivo en recursos y con rendimientos por hectárea que limitan su oferta masiva y, por tanto, al no satisfacerse la demanda de estos, se tendría que considerar su importación.

Esto crea una desventaja competitiva para el diésel renovable en el mercado de combustibles de reemplazo directo (*drop-in fuels*), porque, a pesar de sus beneficios ambientales, como la reducción de emisiones de GEI, su viabilidad comercial está fuertemente atada a la fluctuación de los precios de los cultivos oleaginosos. Además, la dependencia de los precios de los alimentos (aunque la estrategia es utilizar aceites vegetales no comestibles), al competir por las mismas tierras agrícolas, complica la economía de los combustibles limpios mencionados, lo que hace que su costo sea volátil y, a menudo, inasequible en comparación con el combustible fósil.

3. CONCLUSIONES

Se han examinado diferentes aspectos del co-HDT de hidrocarburos y aceite vegetal. La viabilidad de utilizar las unidades de HDT existentes para producir combustibles limpios representan una amalgama de innovación tecnológica y uso eficiente de recursos renovables encajando en un modelo de economía circular. En comparación con el DUBA obtenido en el HDT de materias primas fósiles, la contribución de los aceites vegetales en el co-HDT mejora la calidad del producto; por ello, la selección de biomasa debe realizarse con cuidado para minimizar los cambios en la estructura de proceso.

Los factores más significativos que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar o modernizar una planta de co-HDT con aceite vegetal y gasóleo son: pretratamiento de la carga, selección de internos, lechos combinados de catalizadores que incluya la actividad, selectividad y estabilidad, balance de energía en el reactor para definir las corrientes de quench y número de camas catalíticas, optimización de la sección de separación y purificación de los productos de reacción, requerimientos de H_2 y la optimización de las condiciones de operación del reactor.

Adicionalmente, la producción de combustibles a partir de aceites vegetales ofrece importantes ventajas socioeconómicas que van más allá de los beneficios ambientales, entre las que destacan promover la diversificación de la matriz energética de un país, fomentar el crecimiento económico y rural de aceites vegetales, así como aprovechar la compatibilidad entre el diésel renovable y el diésel comercial en los motores existentes, lo que reduce la dependencia de los combustibles fósiles y, en consecuencia, fortalece la seguridad energética nacional y constituye un esfuerzo en la transición energética.





TABLA 2. Características de la calidad del producto diésel

Propiedades	DUBA	DR (co-HDT)	DR (Ecofining™)	DR (NExBTL™)
Peso específico @ 15°C	0.84	0.775-0.785	0.78	0.780-0.785
Viscosidad @ 40°C (mm²/s)	1.9-4.1	2.9-3.5	----	3.0-3.5
Número de cetano	40-52	84-99	70-90	98-99
Punto de enturbiamiento (°C)	-5 a +12	-5 a -30	-20 a +20	-5 a -34
Intervalo de curva destilación (°C)	200-350	190-320	265-320	260-300
Poder calorífico (MJ/kg)	43	44	44	44
Aromáticos totales	<12 (% vol.)	0 (% peso)	----	0 (% peso)
Poliaromáticos	8-12 (% vol.)	0 (% peso)	0 (% vol.)	0 (% peso)
Contenido de O ₂ (% peso)	0	0	0	0
Contenido de S (ppm)	15 máx.	0	<2	<10

DR: diésel renovable

APÉNDICE A

Estudios de co-HDT de hidrocarburos y lípidos (Tabla A1).

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo brindado por el Instituto Mexicano del Petróleo. Además, el autor Carlos Cárdenas agradece a la SECIHTI por el soporte de su beca de estancia posdoctoral.

REFERENCIAS

- [1]. British Petroleum (BP), *Statistical review of world energy* (2022).
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- [2]. Furimsky E, *Hydroprocessing challenges in biofuels production*. Catalysis today 217:13-56 (2013).
- [3]. Bezergianni S, Dimitriadis A, Kikhtyanin O and Kubička D, *Refinery co-processing of renewable feeds*. Progress in energy and combustion science 68:29-64 (2018).
- [4]. Holmgren J, Gosling C, Marinangeli R, Marker T, Faraci G and Perego C, *New developments in renewable fuels offer more choices*. Hydrocarbon processing 86:67-71 (2007).
- [5]. Choudhary TV and Phillips CB, *Renewable fuels via catalytic hydrodeoxygenation*. Applied catalysis A: General 397:1-12 (2011).
- [6]. D. Kubička and V. Tukač, *Hydrotreating of triglyceride-based feedstocks in refineries*, in Chemical Engineering for Renewables Conversion, Netherlands, 2013, pp 141-194.
- [7]. Su J, van Dyk S and Saddler J, *Repurposing oil refineries to “stand-alone units” that refine lipids/oleochemicals to produce low-carbon intensive, drop-in biofuels*. Journal of cleaner production 376:134335 (2022).
- [8]. F. Baldiraghi, M.D. Stanislao, G. Faraci, C. Perego, T. Marker, C. Gosling, P. Kokayeff, T. Kalnes and R. Marinangeli, *Ecofining: New process for green diesel production from vegetable oil*, in Sustainable Industrial Processes, Weinheim, 2009, pp 427-438.
- [9]. Šimáček P and Kubička D, *Hydrocracking of petroleum vacuum distillate containing rapeseed oil: Evaluation of diesel fuel*. Fuel 89:1508-1513 (2010).
- [10]. Bezergianni S, Dimitriadis A and Chrysikou LP, *Quality and sustainability comparison of one- vs. two-step catalytic hydroprocessing of waste cooking oil*. Fuel 118: 300-3078 (2014).
- [11]. Al-Sabawi M and Chen J, *Hydroprocessing of biomass-derived oils and their blends with petroleum feedstocks: A review*. Energy & fuels 26:5373-5399 (2012).
- [12]. van Dyk S, Su J, McMillan J D and Saddler J, *Potential synergies of drop-in biofuel production with further co-processing at oil refineries*. Biofuels, bioproducts and biorefining 13:760-755 (2019).
- [13]. van Dyk S, Su J, Ebadian M and Saddler J, *Production of lower carbon-intensity fuels by co-processing biogenic feedstocks: Potential and challenges for refineries*. Fuel 324:124636 (2022).
- [14]. Huber GW, O'Connor P and Corma A, *Processing biomass in conventional oil refineries: Production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures*. Applied catalysis A: General 329:120-129 (2007).
- [15]. Kubička D, *Future refining catalysis – Introduction of biomass feedstocks*. Collection of czechoslovak chemical communications 73:1015-1044 (2008).





- [16]. Veriansyah B, Han JY, Kim SK, Hong SA, Kim YJ, Lim JS, Shu YW, Oh SG and Kim J, *Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts*. Fuel 94:578-585 (2012).
- [17]. Donnis B, Egeberg RG, Blom P and Knudsen KG, *Hydroprocessing of bio-oils and oxygenates to hydrocarbons. Understanding the reaction routes*. Topics in catalysis 52:229-240 (2009).
- [18]. Pricel P, Kubička D, Čapek L, Bastl Z and Ryšánek P, *The role of Ni species in the deoxygenation of rapeseed oil over NiMo-alumina catalysts*. Applied catalysis A: General 397:127-137 (2011).
- [19]. Kiatkittipong W, Phimsen S, Kiatkittipong K, Wongsakulphasatch S, Laosiripojana N and Assabumrungrat S, *Diesel-like hydrocarbon production from hydroprocessing of relevant refining palm oil*. Fuel processing technology 116:16-26 (2013).
- [20]. Sebos I, Matsoukas A, Apostolopoulos V and Papayannakos N, *Catalytic hydroprocessing of cottonseed oil in petroleum diesel mixtures for production of renewable diesel*. Fuel 88:145-149 (2009).
- [21]. Vonortas A, Templis Ch and Papayannakos N, *Effect of palm oil content on deep hydrodesulfurization of gas oil-palm oil mixtures*. Energy & fuels 26:3856-3863 (2012).
- [22]. Chen J, Farooqi H and Fairbridge C, *Experimental study on co-hydroprocessing canola oil and heavy vacuum gas oil blends*. Energy & fuels 27:3306-3315 (2013).
- [23]. Vonortas A and Papayannakos N, *Kinetic study of the hydrodesulfurization of a heavy gasoil in the presence of free fatty acids using a CoMo/ γ -Al₂O₃ catalyst*. Industrial & engineering chemistry research 53:9646-9652 (2014).
- [24]. Kumar R, Rana BS, Tiwari R, Verma D, Kumar R, Joshi RK, Garg MO and Sinha AK, *Hydroprocessing of jatropha oil and its mixtures with gas oil*. Green Chemistry 12:2232-2239 (2010).
- [25]. Satyarthi JK, Chiranjeevi T, Gokak DT and Viswanathan PS, *Studies on co-processing of jatropha oil with diesel fraction in hydrodesulfurization*. Fuel processing technology 118:180-186 (2014).
- [26]. Rizo-Acosta P, Linares-Vallejo MT and Muñoz-Arroyo JA, *Co-hydroprocessing of a mixture: Vegetable oil/n-hexadecane/4,6-dimethyldibenzothiophene for the production of sustainable hydrocarbons. A kinetic modeling*. Catalysis today 234:192-199 (2014).
- [27]. Templis Ch, Vonortas A, Sebos I and Papayannakos N, *Vegetable oil effect on gasoil HDS in their catalytic co-hydroprocessing*. Applied catalysis B: Environmental 104:324-329 (2011).
- [28]. Walendziewski J, Stolarski M, Łużny R and Klimek B, *Hydroprocessing of light gas oil – rape oil mixtures*. Fuel processing technology 90:686-691 (2009).
- [29]. Mikulec J, Cvengroš J, Joríková L, Banič M and Kleinová A, *Second generation diesel fuel from renewable sources*. Journal of cleaner production 18:917-926 (2010).
- [30]. Egeberg R, Michaelsen N, Skyum L and Zeuthen P, *Hydrotreating in the production of green diesel*. Petroleum technology quarterly Q2:101-113 (2010a).
- [31]. Egeberg RG, Knudsen KG, Blom NJ and Hansen JA, *Hydroconversion process and catalyst*. WO2010/028717 A2 (2010b).
- [32]. Kalnes T, Marker T and Shonnard DR, *Green diesel: A second generation biofuel*. International journal of chemical reactor engineering 5:A48 (2007).
- [33]. Mikkonen S, *Second-generation renewable diesel offers advantages*. Hydrocarbon processing 87:63-66 (2008).
- [34]. Bart, J.C.J., et al. *Biodiesel Science and Technology – From Soil to Oil*. CRC Press (2010).
- [35]. No SY, *Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines – A review*. Fuel 115:88-96 (2014).





TABLA A1. Estudios de co-HDT de hidrocarburos y lípidos

Tipo de reactor	Materia prima		Contenido de biomasa en la carga	Tipo de catalizador	Condiciones de reacción T (°C); P (MPa); LHSV (h ⁻¹) o WHSV (h ⁻¹); relación H ₂ /carga (NL/L)	Ref.
	Biomasa	Carga				
Reactor de lecho fijo (escala de banco)	AC	GPV	5, 10, 20% peso	NiMo/Al ₂ O ₃	T = 360-395; P = 8-11; LHSV = 1-2.5; relación H ₂ /carga = 800	22
Reactor isotérmico de lecho escurrido (escala de banco)	AVA	GPA	2.5, 5, 10, 20% peso	CoMo/Al ₂ O ₃	T = 310, 330, 350; P = 3.3; WHSV = 0.7, 1, 1.4; Flujo de alimentación de H ₂ = 20 NL/h;	23
Reactor de lecho fijo	AP	DD	5, 10, 20% peso		Flujo de materia prima = 28, 40, 56 g/h	
Reactor de lecho fijo	AJ	G	5, 10% peso	NiMo/Al ₂ O ₃ , CoMo/Al ₂ O ₃ , NiW/SiO ₂ -Al ₂ O ₃	T = 340-380; P = 5; LHSV = 2; relación H ₂ /carga = 1500	24
Reactor de lecho fijo (escala de banco)	AJ	GLA	10% peso	CoMo/Al ₂ O ₃ (comercial), NiMo/Al ₂ O ₃ (laboratorio)	T = 350; P = 5; WHSV = 1.2;	25
			20, 30, 40, 50% peso		Flujo de alimentación de H ₂ = 4, 10, 21 NL/h	
Reactor Robinson Mahoney de flujo continuo	AJ	nC ₁₆ + 4,6-DMDBT	20% peso	NiMo/Al ₂ O ₃	T = 340, 350, 360; P = 8; LHSV = 0.7, 1, 2.5; Flujo de alimentación de H ₂ = 1-3.5 NL/h	26
Reactor isotérmico de lecho escurrido (escala de banco)	AP	GPA	2.5, 5, 10% peso	CoMo/Al ₂ O ₃	T = 310, 330, 350; P = 3.3; WHSV = 0.7, 1, 1.4; Flujo de alimentación de H ₂ = 20-22 NL/h;	27
Reactor de lecho empacado de flujo continuo	ACZA	GLA	10, 20% peso	NiMo/Al ₂ O ₃	Flujo de materia prima = 28-56 g/h	
					T = 320, 350, 380; P = 5; LHSV = 2; relación H ₂ /carga = 500	28
Reactor de lecho empacado	ACZA	GLA	6.5% vol.	NiMo/TiO ₂ , NiW/NaY, NiW/TiO ₂ , NiW/ZrO ₂	T = 350; P = 3; LHSV = 2; relación H ₂ /carga = 500	29
				NiMo/Al ₂ O ₃	T = 360; P = 3.5; LHSV = 1; relación H ₂ /carga = 1000	
					T = 380; P = 5.5; LHSV = 1; relación H ₂ /carga = 1000	

4,6-DMDBT	4,6-dimetildibenzotiofeno
AC	aceite de canola
ACZA	aceite de colza
AJ	aceite de jatropha
AP	aceite de palma
AVA	aceite vegetal ácido
DD	diésel desulfurado
G	gasóleo
GLA	gasóleo ligero atmosférico
GPA	gasóleo pesado atmosférico
GPV	gasóleo pesado de vacío





Análisis tecnoeconómico del proceso de cogeneración de biomasas residuales

BRENDA I. LÁZARO-MOLINA¹, KEVIN E. PALACIOS-SAMANO¹, MAURICIO SALES-CRUZ² Y TERESA LÓPEZ-ARENAS²

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, Posgrado en Ciencias Naturales e Ingeniería, CDMX, 05348, México

²Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, Departamento de Procesos y Tecnología, CDMX, 05348 México

Autor de Correspondencia: Teresa López-Arenas (e-mail: mtlopez@cua.uam.mx)

Este proyecto fue apoyado por el **SECIHTI** en el año 2024 (**CBF2023-2024-3615**).

RESUMEN El uso de residuos que provienen de fuentes agroindustriales o municipales representan una alternativa sostenible para la cogeneración a través de biorrefinerías. En este trabajo se realiza el diseño y evaluación tecno-económica para comparar la eficiencia del proceso de incineración para generar bioenergía a partir de dos biomasas residuales: la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y el bagazo de caña de azúcar. La metodología emplea herramientas computacionales de modelado y simulación de procesos. La evaluación técnica considera la resolución de los balances de materia y energía, verificando los rendimientos de vapor y electricidad obtenidos. Mientras que en la evaluación económica, para determinar la rentabilidad del proceso, se calcula el retorno sobre la inversión y el periodo de recuperación de la inversión. Las biorrefinerías propuestas son evaluadas en un rango amplio de cantidad de biomasa alimentada. Los resultados comparativos para los casos de estudio muestran que el bagazo de caña de azúcar es mejor opción para invertir en la implementación industrial de un proceso sostenible.

PALABRAS CLAVE: Biorrefinerías, residuos agroindustriales, bioenergía, cogeneración, simulación.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional, junto con la volatilidad en los precios del petróleo y las fluctuaciones económicas nacionales han acentuado la necesidad de alternativas energéticas sostenibles. La dependencia de combustibles fósiles genera impactos ambientales y sanitarios significativos. En respuesta, las biorrefinerías basadas en residuos (biomasas de segunda generación) surgen como una

solución viable para atender simultáneamente la demanda energética y la gestión de residuos en países en desarrollo. El uso de residuos que provienen de fuentes agroindustriales o municipales representan una alternativa sostenible para la cogeneración a través de biorrefinerías.

La cogeneración (en inglés CHP, Combined Heat and Power) se refiere a la producción simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de combustión directa de una sola fuente combustible. Es un proceso probado y confiable que se utiliza principalmente en plantas de energía centralizadas a gran escala, y se ha aplicado durante más de 100 años [1]. A nivel mundial la electricidad producida por plantas CPH alcanzó 4120 TW-h, en 2020, que equivale al 15% de la electricidad total; usando como combustible: 60% carbón, 32% gas natural, y 6% biocombustibles y residuos [2]. Aunque los sistemas de cogeneración CHP presentan algunas inconvenientes (como la dependencia de combustibles fósiles y emisiones límites de CO₂), también presentan ventajas que incluyen a alta eficiencia, ahorro de costos, mayor seguridad energética y amplia aplicabilidad geográfica.

El objetivo de este trabajo es realizar el diseño, la simulación y la evaluación tecno-económica de una biorrefinería que valore residuos orgánicos, comparando la eficiencia del proceso de cogeneración de dos biomasas residuales:

1. Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU); y
2. bagazo de caña de azúcar (BCA) que es un residuo obtenido en los ingenios azucareros.



2. METODOLOGÍA

La metodología emplea herramientas computacionales de modelado y simulación de procesos. Primero se determinaron las composiciones de las materias primas. Luego se realizó e implementó el diseño de la biorrefinería. Y por último, se evaluaron las biorrefinerías para las dos biomazas seleccionadas. A continuación se describe cada etapa metodológica.

2.1. Composición de las biomazas

Por una parte, la FORSU está constituida por la materia orgánica desechada, principalmente alimentos de fuentes como los hogares, mercados, restaurantes, entre otros. De acuerdo con la SEDEMA [3] estos desechos representan el 46.8 % del total de residuos sólidos urbanos generados. La heterogeneidad de la FORSU dificulta la caracterización, no obstante, ha sido posible establecer su composición proveniente de diversos países, incluyendo la Ciudad de México (CDMX) [4]. Esta composición en base seca (BS), reportada para la CDMX, contiene principalmente (p/p) 52.9% de carbohidratos (incluyendo 21.1% de celulosa y 5.1% de hemicelulosa), 17.5 % de lípidos, 15.2% de proteínas, 13.5% de lignina y 0.9% de sólidos inertes. Siendo importante considerar que la FORSU recolectada tiene un contenido de 70% de humedad.

Por otra parte, un ingenio azucarero es una planta industrial que procesa la caña de azúcar para extraer la sacarosa del jugo, quedando el BCA como residuo sólido fibroso. Históricamente, el bagazo se ha utilizado como combustible en los ingenios azucareros para generar energía en las calderas [5]. Para evitar su deterioro durante su almacenamiento, se elimina el exceso de humedad mediante secado solar. Su composición en BS (p/p) usada en este estudio es 43.7% de celulosa, 27% de hemicelulosa, 13.4% de lignina, 8.9% de sólidos inertes [6]. Se asume que el contenido de humedad del BCA almacenado es del 7%.

2.2. Diseño y evaluación técnica

La Figura 1 presenta el diagrama de flujo del proceso de cogeneración, implementado en el simulador de procesos SuperPro Designer® v14. De forma general, la biorrefinería consiste en primero triturar la materia prima (SR-101), seguido de la elaboración de pellets de biomasa (XD-101) para someterlos a combustión. Los pellets son incinerados (SG-101), y el calor generado es aprovechado para producir vapor de alta presión. Este vapor se introduce a una turbina de expansión (SE-101) para cogenerar energía térmica (vapor saturado) y energía eléctrica.

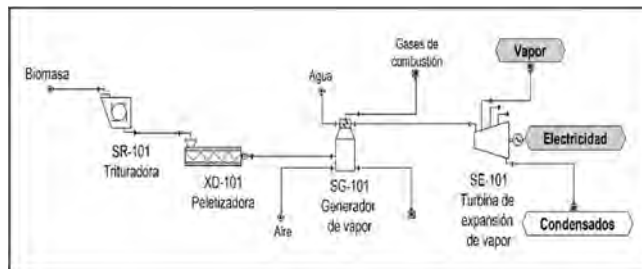


FIGURA 1. Diagrama de flujo del proceso de cogeneración.

Para la evaluación técnica de la biorrefinería:

- se establecen las operaciones unitarias y sus condiciones de operación,
- se consideran las dimensiones del equipo de acuerdo con la cantidad de materia prima alimentada, y
- se resuelven los balances de materia y energía para verificar la capacidad instalada de la planta y determinar los rendimientos de vapor y electricidad generados.

2.3. Evaluación económica

El análisis económico, independiente del análisis técnico, se realiza habitualmente utilizando criterios de inversión, ya sean con o sin descuento de flujo de efectivo [7]. A pesar de los numerosos criterios de inversión disponibles, prácticamente los más utilizados son el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), el retorno sobre la inversión (ROI) y el período de retorno (PR).

En este trabajo se seleccionaron como parámetros económicos el ROI y el PR, cuyos valores deben ser mayores al 15% y menor a 4 años respectivamente para considerar que el proyecto de inversión es rentable y exitoso [8]. La evaluación económica se calcula en dólares americanos, y se consideran costos de adquisición de materias primas (0.02 \$/kg FORSU y 0.015 \$/kg), compra de equipos, servicios (agua de enfriamiento y electricidad consumida), mano de obra, construcción, instalación, impuestos (30%), y depreciación (10 años). Mientras que el análisis técnico-económico se realiza evaluando los criterios de rentabilidad para un rango determinado de cantidad de materia prima alimentada a la biorrefinería, para determinar la región de viabilidad y comparar la energía generada con las dos biomazas residuales (FORSU y BCA).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de factibilidad

Primero se evaluaron los balances de materia y energía para una cantidad de alimentación BS de biomasa residual equivalente a 400,000 toneladas anuales, como se muestra en la Tabla 1. Debido a su composición y capacidad energética, se puede observar que la producción de vapor y electricidad es mayor para la FORSU que para el BCA. Es importante aclarar que los rendimientos reportados en esta tabla son independientes del flujo másico de la alimentación de biomasa ya que están fijos por las condiciones de operación.

TABLA 1. Resultados de la evaluación técnica

Concepto	FORSU	BCA
Alimentación BH (t/a)	1,333,333	430,108
Alimentación BS (t/a)	400,000	400,000
Electricidad generada (MW-h/a)	320,000	192,041
Vapor generado (t/a)	2,704,000	1,627,338
Rendimiento de electricidad (MW-h/t BS)	0.80	0.48
Rendimiento de vapor (t vapor/t BS)	6.76	4.07

Al realizar la evaluación económica reportada en la Tabla 2, de manera contraria, el proceso usando FORSU resulta que no es rentable, ya que el ROI es menor a 15% y se lograría la recuperación de la inversión en un tiempo no deseable mayor a 4 años. Por su parte, una biorrefinería con BCA si muestra una rentabilidad atractiva (53.84% de ROI y 1.72 años de PR). Esto es debido a que la FORSU tiene mayor humedad (70%) que el BCA (7%), lo cual involucra equipos de mayor dimensión y, por ende, mayor capital de inversión (como se observa en la Tabla 2).

TABLA 2. Resultados de la evaluación económica

Concepto	FORSU	BCA
Costo de inversión	191,721,00	47,147,00
Ingresos (vapor y electricidad)	90,102,721	52,944,49
Costos de operación	77,711,000	19,154,00
Ganancia bruta	12,391,000	33,790,00
Ganancia neta	24,162,000	27,399,00
ROI (%)	12.60	53.84
PR (a)	7.93	1.72

También en la Tabla 2 puede observarse que los costos de operación son mayores para la biorrefinería usando FORSU que empleando BCA, debido a que la planta industrial es de

mayor capacidad instalada. Aunque la distribución de los gastos de operación es similar para ambas biorrefinerías como puede verse en la Figura 2. Cabe mencionar que el concepto de gastos dependientes de las instalaciones incluye mantenimiento, seguros, depreciación y materiales indirectos.

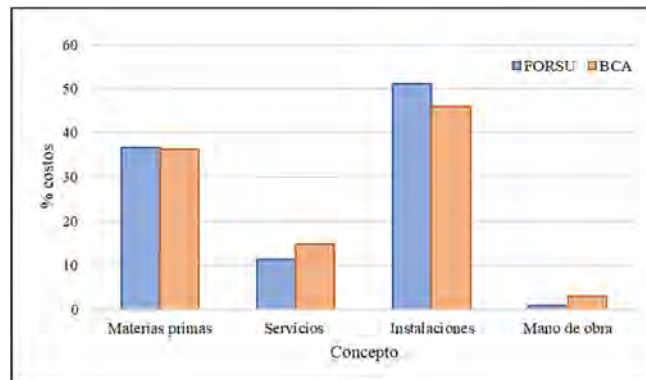


FIGURA 2. Distribución de los costos de operación de la biorrefinería.

3.2. Análisis técnico-económico

Para este análisis se consideró una variación de la cantidad de alimentación de biomasa residual en base húmeda (BH) entre 200,000 y 2,000,000 t/año. Los resultados se presentan en las Figuras 3 y 4.

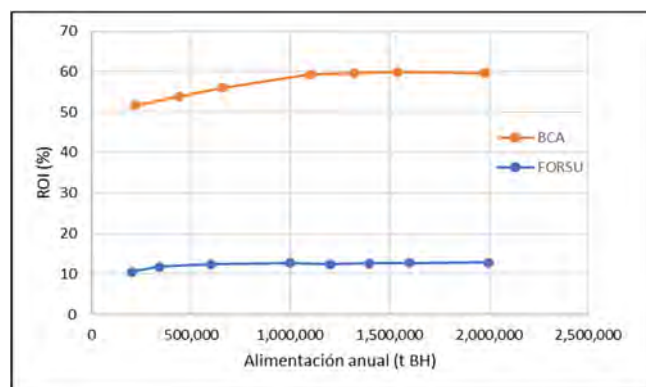


FIGURA 3. Retorno sobre la inversión variando la cantidad de alimentación de materia prima.

Respecto al ROI, se observa en la Figura 3 que al aumentar la cantidad de alimentación se logra mayor tasa de retorno. Cuando se emplea FORSU, el ROI siempre es bajo (menor al 15%) por lo cual no depende de la cantidad alimentada. Mientras que al emplear BCA se observa un aumento



sustancial entre 200,000 y 1,000,000 t/a; y luego se mantiene el ROI casi constante en 60%. Estos valores son bastante altos, y garantizan el éxito de la inversión para cogeneración.

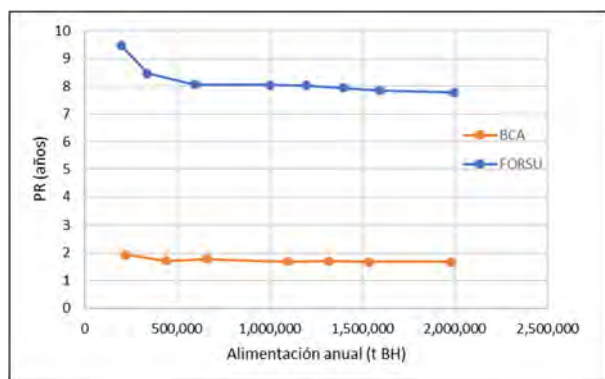


FIGURA 4. Período de retorno sobre la inversión variando la cantidad de alimentación de materia prima.

Con relación al PR, los resultados de la Figura 4 muestran nuevamente que los tiempos de recuperación de la inversión son muy atractivos usando BCA con PR menores a 2 años. Mientras que los PR usando FORSU son mayores a 8 años, lo cual indica de nuevo que no es un proyecto rentable aún y cuando se procesen cantidades grandes de FORSU.

4. CONCLUSIONES

La energía de biomásas residuales puede aprovecharse para generar calor, electricidad y biocombustibles. Las ventajas de estas bioenergías es que son renovables, sostenibles, diversifican la matriz energética y apoyan el desarrollo rural. No obstante, su aprovechamiento tiene desventajas como son la eficiencia y los costos de inversión. En este estudio se presentó una alternativa para la cogeneración de vapor y electricidad mediante la combustión de dos biomásas. Se propuso un diseño para una biorrefinería a escala industrial, contrastando rendimientos, costos, tasas y períodos de recuperación de la inversión, y con ello observando el cambio en la factibilidad técnica y en la rentabilidad. Los resultados mostraron que una biorrefinería para la cogeneración a partir de BCA es un proyecto de inversión éxitos, no obstante usando FORSU no es recomendable económicamente. Como trabajo futuro se pretende ampliar este estudio a otras biomásas residuales, como son los residuos agroindustriales (rastreo de maíz, bagazo de agave) y biomásas con impacto ambiental (como el sargazo y algas). En particular para la FORSU, se buscarán otras alternativas tecnológicas para la producción de bioenergía, como es la digestión anaerobia o la fermentación.

REFERENCIAS

Artículos

- [1]. Chakraborty, A., Joshi, M., Manjare, S., Karimi, I.A., *An industrial perspective of cogeneration – A comprehensive review*, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 205, 109974 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109974>.
- [2]. Global Cogeneration Market Overview, 2nd Edition, www.cogenworld.org (2023).
- [3]. SEDEMA (La Secretaría del Medio Ambiente), *Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México* (2021) https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025_N_ago21.pdf
- [4]. Campuzano, R., González-Martínez, S., *Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review*. Waste Management, 54, 3-12 (2016).
- [5]. Aguilar-Rivera, N., *Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel*. Ingeniería, investigación y tecnología, 12(2), 189-197 (2011). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432011000200008&lng=es&tlng=es.
- [6]. Gonzalez-Contreras, M., Lugo-Mendez, H., Sales-Cruz, M., Lopez-Arenas, T. *Synthesis, design and evaluation of intensified lignocellulosic biorefineries - Case study: Ethanol production*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 159, 108220 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108220>.
- [7]. Biezma, M.V., San Cristóbal, J.R., *Investment criteria for the selection of cogeneration plants—a state of the art review*. Applied Thermal Engineering, 26 (5-6), 583-588 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.07.006>.

Libros

- [8]. Sullivan, W.G., Wicks, E.M., Luxhoj, J.T., *Ingeniería económica de DeGarmo*, Pearson Educación, México, 12 Edición (2004). ISBN: 970-26-0529-6.



Producción de bioenergía y biocombustibles a partir de residuos de café gastado

JANET UREÑA-QUINTANA¹, RICARDO V. RIVERA-DIMAS¹, KEVIN E. PALACIOS

SAMANO¹, BRENDA I. LÁZARO MOLINA¹, TERESA LÓPEZ-ARENAS^{*2}

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, Posgrado en Ciencias Naturales e Ingeniería, CDMX, 05348, México

²Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, Departamento de Procesos y Tecnología, CDMX, 05348 México

Autor de Correspondencia: Teresa López-Arenas (e-mail: mtlopez@cua.uam.mx).

Este proyecto fue apoyado por el **SECIHTI** en el año 2024 (CBF2023-2024-3615).

RESUMEN Los efectos del cambio climático a nivel global visibilizan la necesidad de desarrollar y evaluar procesos alternativos para la producción de energía eléctrica y combustibles, con el fin sustituir la demanda de las fuentes convencionales de manera gradual. En este contexto de la transición energética, los procesos agroindustriales generan residuos orgánicos (biomasas) con características que pueden ser aprovechadas para generar bioenergía y biocombustibles. Particularmente los residuos de café gastado (RCG), generados durante el consumo del café tostado resulta de interés para la producción de biocombustibles y la cogeneración de energía térmica y eléctrica. En este trabajo se realiza el diseño, simulación y evaluación de una biorrefinería a nivel industrial, proponiendo dos configuraciones diferente: Caso I para la producción de biodiesel, y Caso II para la producción de vapor y electricidad. La evaluación considera los rendimientos de los productos, así como una evaluación económica en función de la tasa de retorno sobre la inversión (RSI) y el tiempo de recuperación de la inversión (TRI). Los resultados muestran que el caso I tiene mejor rendimiento, debido a que presenta RSI (78%-109%) significativamente más altos que los del caso II (9.67%-39%), así como TRI inferiores, que permitirían recuperar la inversión de forma agilizada.

PALABRAS CLAVE: Simulación, residuos orgánicos, economía circular, cogeneración, biodiesel.

principalmente en dos formatos: café soluble y café tostado. De esta cantidad, el 40% se comercializa directamente como café en grano, mientras que el 60% es transformado por la industria para la elaboración de café soluble [1]. El procesamiento del café genera residuos en sus distintas etapas, como se muestra en la Figura 1. Los residuos más relevantes son la cáscara de café obtenida tras la cosecha, la pulpa plateada obtenida en el tostado del grano verde, y los residuos de café gastado (RCG) obtenidos de la extracción del café tostado/molido como en la producción de café soluble [2].

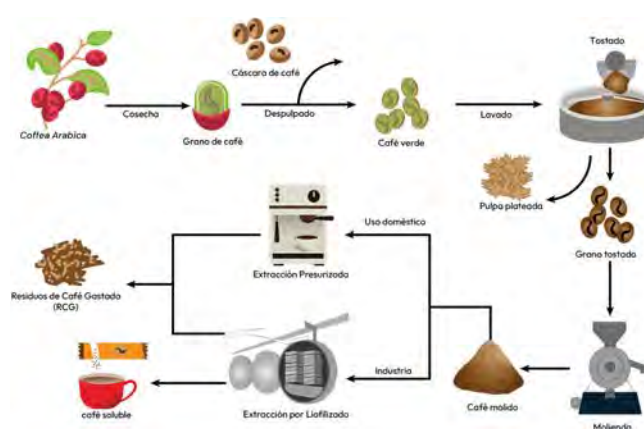


FIGURA 1. Residuos obtenidos durante el procesamiento en la industria del café.

1. INTRODUCCIÓN

En México, el consumo anual de café alcanza aproximadamente 174,000 toneladas, distribuido

1.1. Valorización de los RCG

Los RCG tienen una relación másica de 0.91 kg RCG seco por cada kg de grano de café, además se estima que en

México se producen 158,340 toneladas anuales de RCG que podrían emplearse como materia prima. Este residuo puede ser valorizado en bioenergía debido a su composición en base seca [3] conformada por hemicelulosa (33% w/w), lignina (25% w/w), lípidos (15% w/w), proteínas (14% w/w), celulosa (11% w/w) y cenizas (2% w/w), y también por su entalpía específica que varía entre 18-22 MJ/kg. Por lo que los RCG podrían transformarse en metabolitos bioactivos [4].

Otro enfoque para el aprovechamiento de los RCG consiste en el aprovechamiento de los triglicéridos y diterpenos presentes en el 90%(w/w) de los lípidos de los RCG [5]. Para este caso, una ruta de conversión es mediante transesterificación empleando CH_3OH y CH_3ONa , para la obtención de biodiesel y glicerol.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en esta investigación queda plasmada en la Figura 2, donde se delinean de manera integral las tres fases fundamentales: síntesis, evaluación y análisis.

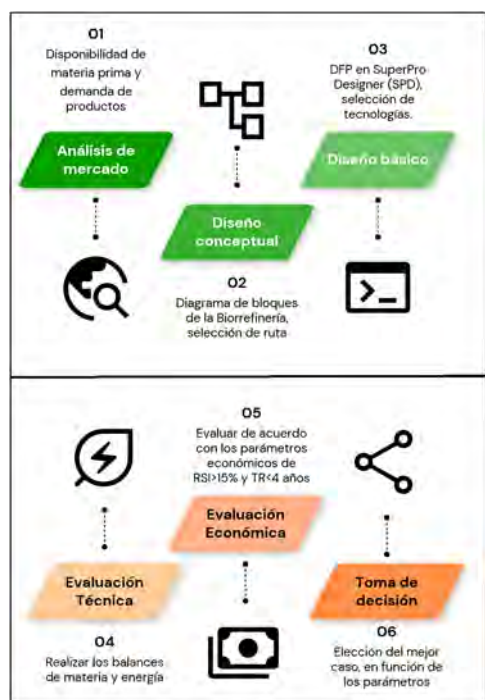


FIGURA 2. Metodología general para el desarrollo y evaluación de las biorrefinerías basadas en RCG.

Durante la etapa de síntesis, se elabora un diseño conceptual que integra las operaciones unitarias indispensables para cada segmento del proceso. Posteriormente, el diseño básico incorpora el estudio de los balances másicos y energéticos, las características fisicoquímicas de los compuestos involucrados, los parámetros cinéticos de las reacciones y las condiciones operativas de los equipos empleados. Enseguida se realiza la evaluación técnica-económica para determinar la viabilidad y rentabilidad; y finalmente determinar cuál es la mejor ruta de procesamiento para una biorrefinería de RCG. Enseguida se detalla cada una de estas fases.

2.1. Rutas y tecnologías de procesamiento

Se consideran dos casos de estudio:

Caso I. La producción de vapor y electricidad mediante un proceso de cogeneración, obteniendo aceite de café como subproducto (Figura 3a).

Caso II. La producción de biodiesel mediante un proceso de transesterificación, obteniendo fertilizante y glicerol como subproductos (Figura 3b).

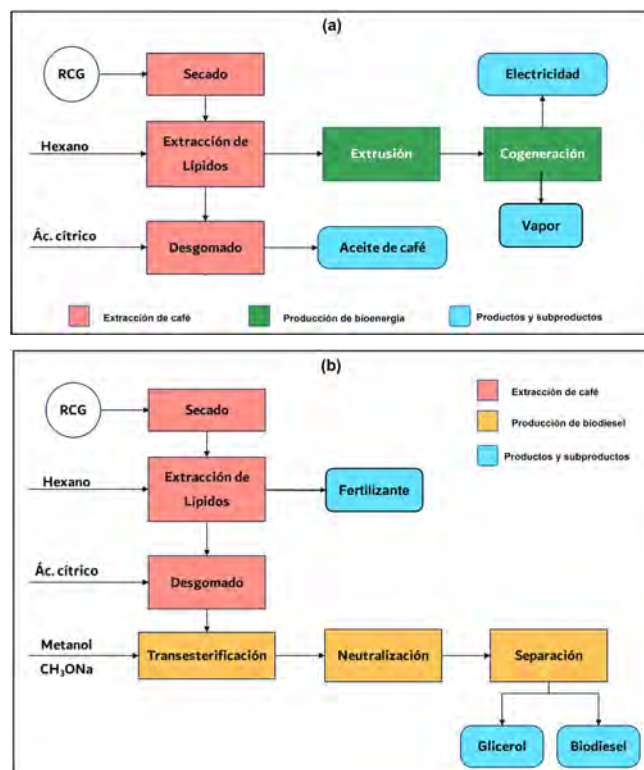


FIGURA 3. Biorrefinería para la producción de: (a) bioenergía y (b) biodiesel.



En la Figura 3, la sección de extracción del aceite (en rojo) es una sección en común para ambos casos de estudio. Esta etapa consiste en un acondicionamiento de los RCG, cuyo punto de partida es la reducción de la humedad de los RCG del 60% [6] hasta alcanzar 6% (w/w). Para continuar se utiliza solubilización de lípidos usando hexano, punto en el que se obtiene RCG desgrasado y seco. Para el Caso I este residuo sólido se dirige a un proceso de peletización por medio de extrusor, mientras que para el Caso II éste se considera como fertilizante. Las etapas en común para los casos de estudio concluyen con el desgomado de los aceites extraídos, para ello se emplea ácido cítrico, esta mezcla se separa por centrifuga y se obtiene una fase rica en triglicéridos y diterpenos, para el Caso I éste se considera como producto (aceite de café), mientras que para el Caso II se alimenta al proceso de transesterificación.

El Caso I (Figura 3a) continua con la formación de los pellets mediante un extrusor para mejorar la densidad energética. Éstos se alimentan a una caldera donde se queman, y se aprovecha el calor generado para la producción de vapor de agua a alta presión, mismo que impulsa una turbina acoplada a un generador eléctrico. Siendo de esta forma que se obtiene electricidad y vapor saturado como productos de la cogeneración.

Para el caso II (Figura 3b), la fase rica en triglicéridos y diterpenos se alimenta a un par de reactores acoplados para llevar a cabo la reacción de transesterificación utilizando metanol y CH_3ONa , recirculando los productos con el propósito de obtener dos corrientes, la primera enriquecida en biodiesel y la segunda en glicerol. Para alcanzar las especificaciones de los productos, de manera paralela se alimentan estas corrientes a reactores para la neutralización del catalizador. Finalmente, con el objetivo de reducir el contenido de agua en las mezclas se emplean evaporadores y se recupera metanol utilizando destilación.

2.2. Metodología de simulación

Las simulaciones de las biorrefinerías para los Casos I y II, así como la evaluación técnica-económica, fueron implementadas en un simulador de procesos modular (*SuperPro Designer*), el cual dispone de herramientas de modelado y simulación de procesos. Para ambos casos se contempla la disponibilidad nacional anual de RCG húmedo. No se consideraron reacciones biológicas, el régimen de operación es continuo, así como 330 días efectivos de operación. Por lo que esto implica la solución de los balances de materia y energía en estado estacionario usando métodos numéricos.

Como punto de partida se considera un rango con respecto a la cantidad de RCG procesados en la planta, para ello se establece un rango de 35-65 t/h ya que el máximo disponible para 2024 es de 57t/h, sin embargo, el consumo de café es variable cada año, por lo que la disponibilidad del residuo puede diferir en próximos periodos.

Los datos alimentados a la simulación están basados en los requerimientos teóricos de cada una de las reacciones planteadas en el proceso, así como las efectividades de los equipos planteados para cada módulo.

2.3. Valoración técnica

A partir de los informes realizados para cada caso se realizó la determinación de la factibilidad técnica que está respaldada principalmente por la determinación de los rendimientos para los casos planteados, dichos rendimientos se proponen en relación con la cantidad de RCG secos usados y la cantidad de producto obtenido para cada producto.

2.4. Valoración económica

Existen diferentes métodos para obtener una valoración económica de una planta, para este caso se propone el uso de parámetros independientes a los flujos de efectivo, pero que consideran el costo de materias primas, equipos, mano de obra, servicios e instalaciones. Dichos parámetros son el retorno sobre la inversión (RSI) que representa el beneficio obtenible en comparación con la inversión y finalmente el tiempo de recuperación de la inversión (TRI). Como criterio de rentabilidad se recomienda que el RSI sea mayor al 15% y el TRI sea menor a 4 años [7].

3. RESULTADOS

3.1. Valoración técnica

Los rendimientos obtenidos de ambos casos de estudio se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. Rendimientos de los productos para las biorrefinerías propuestas.

Parámetro	Rendimiento de producto	Valor	Unidades
Caso I Y_E	Electricidad	0.17	MW-h/t RCG
Caso I Y_{CO}	Aceite de café	0.11	t/t RCG
Caso I Y_{wv}	Vapor de agua	4.31	t/t RCG
Caso II Y_{BF}	Biofertilizante	84.70	t/t RCG
Caso II Y_{BD}	Biodiesel	10.81	t/t RCG
Caso II Y_{GL}	Glicerol	1.59	t/t RCG



Los rendimientos para el caso I indican que de manera directa se obtiene un 11% de la masa del RCG en forma de aceite de café, que tiene importancia para usos cosméticos, mientras que el resto se emplea para el proceso de cogeneración resultado en que se pueden obtener 170 kWh por cada t de RCG, a la par que se puede obtener 4.31 t vapor de agua a 46°C por cada t de RCG. Con respecto al caso II todos los productos son evaluados por la masa producida, de ello se obtiene que a partir de los RCG secos se obtiene un índice de aprovechamiento del 97%, sin embargo, el producto principal es el biofertilizante y el biodiesel se obtiene en un 10.81%.

Otro aspecto relevante es la demanda de los servicios considerados para el funcionamiento de la planta, para realizar una comparación en igualdad de condiciones, se consideran los costos asociados para la electricidad, el vapor de agua que se usa en algunas etapas como agente de calentamiento, así como el agua de enfriamiento. Este comportamiento se observa en la Figura 4.

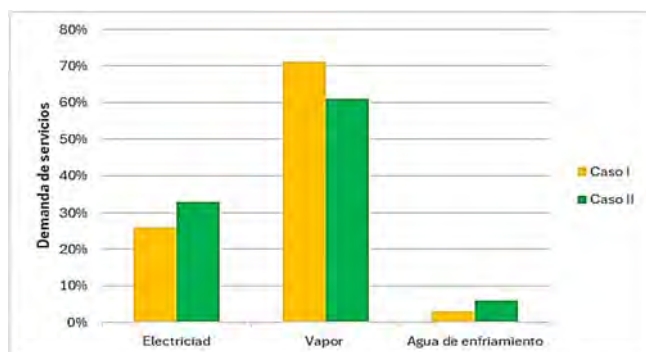


FIGURA 4. Distribución de costos de los servicios para cada caso.

El servicio de mayor demanda para ambos casos es el vapor para calentamiento, siendo que para el Caso I representa el 71% de la inversión en servicios, mientras que para el Caso II tiene un valor cercano al 61%. El segundo servicio requerido es la energía eléctrica siendo que para el Caso I y II está son 26% y 33%, respectivamente. Finalmente, el servicio que representa un menor costo es el agua para tareas de enfriamiento con valores menores al 10% en ambos casos.

3.2. Evaluación económica

El primer parámetro de evaluación económica es el TRI que plantea el tiempo en el que se esperan obtener beneficios que compensen la inversión realizada hasta ese punto, éste se mide en años a partir del inicio del proyecto. En la Figura

5 se observa que los TRI del Caso I son menores para todos los escenarios analizados y se mantienen alrededor de 0.92-1.28 años. Por otra parte, el Caso II tiene un máximo alrededor de 9.7 años lo que indica que es inversamente proporcional a la cantidad de RCG alimentados y el mínimo obtenible es de 2.6 años.

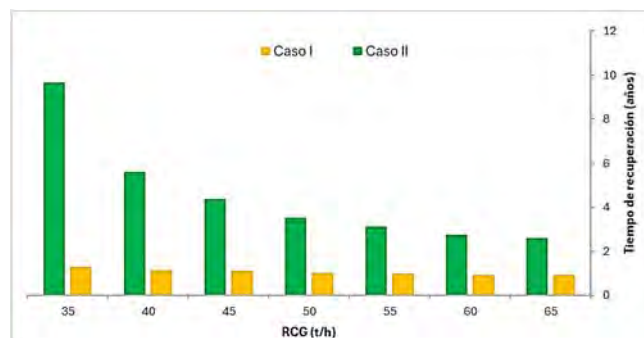


FIGURA 5. Tiempo de recuperación de la inversión para cada caso en función de la capacidad instalada.

El RSI es una medida de para determinar los dividendos en función de la inversión realizada, los valores que se obtienen se representan en la Figura 6. Para el caso I se obtiene un mayor margen de rentabilidad en todos los escenarios analizados con valores que están entre 78-109%, por lo que este caso representa la opción de mayor rentabilidad. En cuanto a el Caso II los valores obtenidos están entre 9.7-39%, siendo todos estos escenarios favorables, pero de menor proporción con respecto al Caso I.

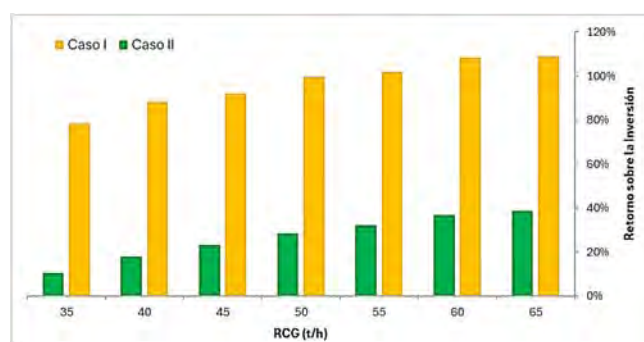


FIGURA 6. Retorno sobre la inversión de cada caso en función de la capacidad instalada de la planta.

4. DISCUSIÓN

Con respecto a las simulaciones evaluadas para los casos de estudio, es pertinente señalar que el costo de adquisición de las materias primas y de venta de los productos (ver Tabla



2) tiene un alto impacto en los resultados económicos obtenidos. En particular, el costo del RCG no representa directamente un costo de adquisición sino un costo relacionado al transporte de este residuo. La presencia de estos valores significa que no se puede atribuir únicamente a la parte de los balances de materia y energía la rentabilidad o no del proceso. En este mismo orden de ideas, actualmente no existe una cultura relacionada a la gestión de este tipo de residuos de manera adecuada, por lo que como trabajo futuro es importante plantear un análisis de la gestión recolección de esta biomasa para su aprovechamiento.

TABLA 2. Costos establecidos para la simulación

Materia Prima/Producto	Costo (\$USD/kg)
RCG húmedo	0.010
Ácido Cítrico	1.070
Metanol	0.286
Hexano	2.000
NaOH	0.617
HCl	0.337
CH ₃ ONa	3.066
Aceite de café	1.800
Biofertilizante	0.100
Biodiesel	0.700
Glicerol	0.330

Para un análisis de mayor profundidad e integral de los casos es necesario realizar un análisis de ciclo de vida utilizando como medida el CO₂ equivalente, esto por la importancia del análisis de impacto ambiental de los procesos. Este estudio al ser un primer acercamiento busca sentar un precedente para desarrollar una investigación direccionada hacia la ingeniería de detalle.

Como parte de las perspectivas futuras de investigación se sugiere evaluar diferentes alternativas de rutas de procesamiento desarrollar modelos más precisos para cada etapa del proceso optimizar las condiciones operativas estudiar esquemas de automatización e incorporar metodologías económicas más robustas como el análisis de valor presente neto (VPN).

5. CONCLUSIONES

La transformación de RCG en biocombustibles y bioenergía representa una alternativa sostenible con potencial económico, aunque requiere mayor desarrollo tecnológico y estudios de factibilidad para superar los retos que implica su implementación a gran escala. El caso de mayor impacto es la producción de bioenergía (Caso I) ya que muestra TRI menores y RSI (78%-109%) mayores a la producción de biodiesel (9.67% - 39%), siendo estos aspectos clave para mayor análisis y posible implementación. Derivado de esta conclusión es de vital importancia expandir el análisis de este estudio a uno de impacto ambiental para obtener una evaluación integral.

REFERENCIAS

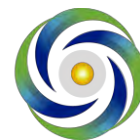
Artículos

- [1]. USDA FAS (Foreing Agricultural Service), *Coffee Annual Mexico Report 2023*, Recuared - Public Distribution No. MX2023-0024 (2023). https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Coffee%20Annual_Mexico%20City_Mexico_MX2023-0024.pdf
- [2]. Bomfim A. S. C. D., De Oliveira, D. M., Walling, E., Babin, A., Hersant, G., Vaneeckhaute, C., *Spent Coffee Grounds Characterization and Reuse in Composting and Soil Amendment*. Waste 1(1), 2–20 (2022). <https://doi.org/10.3390/waste1010002>
- [3]. Battista, F., Barampouti, E. M., Mai, S., Bolzonella, D., Malamis, D., Moustakas, K., Loizidou, M., *Added-value molecules recovery and biofuels production from spent coffee grounds*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 131, 110007 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110007>
- [4]. Singh, T.A., Pal, N., Sharma, *Spent coffee ground: transformation from environmental burden into valuable bioactive metabolites*. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 22, 887–898 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09669-w>
- [5]. Pazmiño Arteaga, J. D., *Aproximación lipidómica al estudio de las alteraciones de la calidad del café verde durante el almacenamiento*. Tesis de doctorado, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia (2020). https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16032/2/Pazmi%3%b1oJhonathan_2020_Caf%3%a9Lipid%3%b3micaEstabilidad.pdf +
- [6]. Tun, M. M., Raclavská, H., Juchelková, D., Růžicková, J., Šafář, M., Štrbová, K., & Gikas, P., *Spent coffee ground as renewable energy source: Evaluation of the drying processes*. Journal of Environmental Management, 275, 111204 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111204>

Libros

- [7]. Seider, D.W., Seader, J.D., Lewis, D.R., Widagd, S., *Product and Process Design Principles: Synthesis Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 2 Edition (2009). ISBN: 978-0470-04895-5





Producción de biocarbón por proceso hidrotérmico a condiciones moderadas empleando residuos orgánicos de fruta común en la Ciudad de México

SARA LAURENES GARCIA^{1,*}, CARMEN REZA SAN GERMAN¹, ROMÁN RAMIREZ LÓPEZ¹, IGNACIO ELIZALDE MARTÍNEZ^{2,*}

¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, CDMX, 07700, México

²Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, CDMX, 07340, México

Autor de Correspondencia: Sara Laurenes García (e-mail: laurenes.garcia.sara@gmail.com); Ignacio Elizalde Martínez (e-mail: ielizaldem@gmail.com).

Este trabajo fue financiado parcialmente por la **Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional**
Números de proyecto: 20254046 y 20252380.

RESUMEN

La generación de los residuos orgánicos en la Ciudad de México provoca la contaminación del suelo y agua y contribuye al calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero. Los residuos orgánicos constituyen el 44% de residuos sólidos urbanos del país y solo el 7% se aprovecha, por lo cual incrementar el porcentaje de utilización de estos residuos es una necesidad urgente. El procesamiento hidrotérmico permite convertir biomasa en biocarbón, biocrudo y gas. El proceso a condiciones moderadas implica menores costos energéticos y de inversión donde el producto principal es carbón. El objetivo de este trabajo fue producir carbón mediante el procesamiento hidrotérmico de cáscaras de naranja y plátano frescas, aprovechando el contenido de humedad, utilizando un reactor batch que operó a presión inicial de 10 bar de nitrógeno, 0.5%-2% de ácido sulfúrico como catalizador, temperaturas de 180-220 °C, con tiempos de reacción de 1 y 2 h y cantidades de agua entre los 10-30 ml por 10 g de biomasa. Los productos de reacción se caracterizaron por carbono orgánico total (TOC-L Shimadzu equipado con el Solid Sample Module SSM-5000A) e infrarrojo (Perkin Elmer Spectrum Two FT-IR); además el producto líquido se caracterizó por turbidez. La fracción líquida presentó diferente contenido de carbono soluble además de partículas sólidas sedimentables, dependiendo de las condiciones de reacción; además se presentaron señales de algunos grupos funcionales de tipo C=O y C-OH. En el carbón las bandas de FTIR se observaron a 1700, 600 y 700 cm⁻¹ atribuibles a grupos funcionales C=O y C-OH, cuya

presencia fue más intensa a mayor severidad de las reacciones. La concentración de carbono COT estuvo en el intervalo entre el 58% al 72% donde la mayor concentración se obtuvo a la mayor severidad del proceso logrando producir un biocombustible del tipo lignito con alto potencial energético.

PALABRAS CLAVE: residuo orgánico, procesamiento hidrotérmico, biocarbón, condiciones moderadas

1. INTRODUCCIÓN

Las grandes ciudades dependen de los recursos externos para realizar sus funciones. Principalmente los insumos que requieren son en términos de agua, energía, así como alimentos. Dentro de las características que distinguen a una ciudad de un poblado rural están los altos conglomerados de personas en las ciudades, y la dedicación a actividades primordialmente secundarias y terciarias para lo cual requieren los recursos antes mencionados. Una vez que los insumos son utilizados por los habitantes de las ciudades, los sobrantes o degradados, se convierten en un problema por los grandes volúmenes y falta de acciones para gestionarlos [Jiménez 2017].

A los desechos en ciudades que estado físico son sólidos se les denomina residuos sólidos urbanos. Estos desechos involucran tanto residuos inorgánicos o también conocidos como reciclables (tales como llantas, vidrio, botellas de plástico) y residuos orgánicos o biodegradables, dentro de





los cuales se ubican los derivados de actividades de jardinería y los obtenidos a partir de alimentos. Estos últimos provienen de mercados, restaurantes, centros educativos, hogares, entre otros [Muñoz y Morales 2018].

En las ciudades existe en diferente medida una amplia gama de residuos orgánicos de origen urbano tales como excedentes de frutas y verduras en diferente grado de descomposición, tortillas y pan duros, y una gran cantidad de cáscara de frutas las cuales no se aprovechan.

La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes del país y se encuentra entre las principales ciudades del mundo por su número de habitantes, siendo en 2023 la población residente de 9,320,906 personas y la población flotante de 2,307,469 personas. En ese mismo año se generaron 12454 t de residuos por día de los cuales solo se aprovecharon 14.19% [SEDEMA, 2023].

Los residuos orgánicos en la CDMX representan el 46.95% del total; otros detalles más específicos no existen y las cifras están muy dispersas [Rodríguez, 2022]. Además, aunque hay importantes acciones en el tema de los residuos, se carece de una estrategia integral al respecto. Disponer los residuos en basureros no ayuda a proteger la salud humana ni el medio ambiente [Romero, 2023; Sedema 2025].

Los residuos orgánicos en general se aprovechan siguiendo dos alternativas: compostaje y producción de energía a través de la valorización térmica, principalmente. Las plantas de composta en CDMX solo procesaron 966 toneladas de residuos orgánicos al día en 2023 [CDMX Planta de carbonización]. Con relación a la valorización energética, en la Ciudad de México se cuenta con una Planta de Carbonización Hidrotermal en el Bordo Poniente, la cual pretende tratar 2500 toneladas por día de residuos orgánicos pero que a finales de 2024 solo se contaba con la capacidad de procesar 72 t/día de residuos orgánicos [Redaccion-Aristegui Noticias, 2024] lo cual está aún muy lejos de los requerimientos.

El proceso hidrotérmico o hidrotermal permite obtener especies químicas y biocombustibles a partir de biomasa de poco valor, a costo y energía reducidos comparado con otras tecnologías y sin el inconveniente de requerir el secado de la biomasa para el procesamiento. Para el proceso se utiliza agua a temperaturas entre 100-700 °C y presiones de hasta 40 MPa. Los productos de la reacción son biocarbón (o hidrocarbón), biocrudo o bioaceite, así como gases combustibles. Respecto a los productos de carbón, éstos pueden utilizarse además de combustibles como carbón activado, fertilizante y acondicionador de suelos [Tran, 2018].

A pesar de los estudios realizados al respecto de la conversión hidrotérmica de residuos, la intensificación de los procesos puede ser una guía que permite orientar las investigaciones al respecto. Estos principios están relacionados con la práctica de la ingeniería química, por ejemplo, con el uso de catalizadores, presiones y temperaturas, agitación y el uso de dispositivos en escala pequeña. Sin embargo, algunos aspectos de los sistemas en miniatura aun no son prácticos por lo que la práctica usual de la ingeniería puede utilizarse para estudiar las reacciones hidrotérmicas de manera convencional, estableciendo parámetros específicos para problemas locales como las tasas de producción requeridas, el tipo de residuos, la disponibilidad de espacios, el impacto ambiental generado, entre otros [Tran, 2018].

El objetivo del presente trabajo fue realizar el procesamiento hidrotérmico de cáscaras de naranja y plátano, residuos típicos de la Ciudad de México a temperaturas y presiones moderadas usando un catalizador ácido en baja concentración en agua, con la finalidad de determinar el efecto de las variables de operación en la producción de carbón en un reactor discontinuo. Además, se caracterizó el líquido restante con la finalidad de establecer la transferencia de materia orgánica al medio acuoso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron 10 g de biomasa húmeda de cáscaras de plátano y naranja frescas. Se realizó el corte de las cáscaras en fragmentos de aproximadamente 0.5 cm x 0.5 cm con la finalidad de poder cargar la biomasa al reactor y que la cantidad de agua agregada fuese suficiente para cubrir la biomasa. El ácido sulfúrico (J.T. Baker, 98.7%) se preparó a la concentración deseada diluyéndolo en agua desionizada (<0.5 de carbono orgánico total, pH 6.4). Una vez adicionada la masa al reactor se agregó la solución ácida.

Para llevar a cabo las reacciones hidrotérmicas, se utilizó un reactor de alta presión y temperatura de la marca Parr, cuya capacidad nominal es de 100 mL. El sistema de reacción está dotado de agitación mecánica controlada, así como también cuenta con control de temperatura. La presión del sistema puede visualizarse en un manómetro y también se registra de manera automática en el controlador del reactor.

Una vez cargada la biomasa y la solución ácida al reactor, éste se cierra herméticamente a un torque de 12 libras-pie, utilizando un torquímetro calibrado. El reactor cuenta con un sello de grafito de alta presión y temperatura por lo que el torque correcto es indispensable. En caso de que se detecte



deterioro del sello de grafito o al realizar pruebas de presión inicial se detecten fugas, se reemplaza el sello del reactor asegurando la puesta en marcha de la reacción

El sistema de reacción cerrado se purgó con nitrógeno (Infra, 99.999%) y posteriormente se presurizó con el mismo gas hasta 10 bar. Una vez que el sistema estuvo estable a la temperatura ambiente, se arrancó el calentamiento hasta el “set point” de temperatura. Las temperaturas que utilizaron en este estudio fueron 180, 200 y 220 °C, mientras que se realizaron las reacciones a tiempos de 1 y 2 h. La concentración del catalizador fue de 0.5%-2 % peso.

Una vez finalizado el tiempo de reacción, se retiró la mantilla de calentamiento del reactor y se procedió a enfriar el equipo con una corriente de aire. A aproximadamente 37 °C se desfogaron los gases de reacción y el producto se filtró para recuperar el carbón y la fracción líquida. Posteriormente el producto sólido se llevó a secar por un tiempo de 2 h a 65 °C en un horno de secado con circulación de aire.

Tanto el producto líquido como el sólido se caracterizaron por carbono orgánico total utilizando un equipo TOC Shimadzu equipado con el Solid Sample Module SSM-5000A con muestreador automático para líquidos y manual para sólidos, con curvas de calibración realizadas con biftalato de potasio (J.T. Baker, 99.5%) para el COT de líquidos y sacarosa (Sigma Aldrich, 99.5%) para el COT de sólidos. El TOC está equipado con detector infrarrojo no dispersivo y adopta el método de oxidación catalítica de combustión. La presión de trabajo fue de 200 KPa y se utilizó aire ultrapuro u oxígeno (Infra) con un flujo de 150 mL/min. El límite de detección es de 4 µg/L y la cantidad de muestra fue de 150 µL, realizando cada medición por triplicado.

Para el análisis de turbidez se empleó un Turbidímetro portátil marca HANNA Instruments modelo HI 98703 calibrado, tomando 20 veces lecturas y promediando para cada muestra. Se utilizaron los estándares de fábrica para la calibración del equipo.

El análisis del FTIR se realizó con un equipo Perkin Elmer Spectrum Two FT-IR, registrando los espectros en un intervalo de número de onda entre 400-4000 cm⁻¹, el equipo utilizado permitió prácticamente eliminar el paso de la preparación de la muestra debido a que en el no es necesario llevar a cabo la preparación de una pastilla sólida con KBr como en otros casos, en este caso las muestras sólidas se depositaban directamente sobre el cristal ATR (diamante) y se presionaban ligeramente con el brazo para asegurar un buen contacto y realizar un “Scan” correcto, posteriormente se limpiaba el cristal ATR con isopropanol para colocar la siguiente muestra; en el caso de las muestras líquidas se

depositaban gotas sobre el mismo cristal ATR y se realizaba el “Scan” y la misma limpieza que en los sólidos.



FIGURA 1. Esquema de la producción de biocarbón por proceso hidrotérmico y caracterización de los productos

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Comportamiento de los parámetros de la reacción

Se evaluaron diferentes comportamientos entre las combinaciones de los parámetros de operación considerando las tres principales; temperatura (180°C-220°C), tiempo (1h-2h) y concentración de H₂SO₄ utilizado como catalizador (0.5%-2%). De la misma manera se estudió el efecto del volumen de agua de proceso en tres cantidades (30, 20 y 10 ml). La biomasa se procesó en lote de 10g (5g de cascara de naranja y 5g de cascara de plátano) con una presión inicial inerte de 10 bar (N₂) y un contenido de humedad intrínseco.

TABLA 1. Matriz experimental de condiciones de reacción : T, t, H₂SO₄ (conc. % p/p) y volumen de agua

RX	T (°C)	t (h)	H ₂ SO ₄ (Conc.%)	Vol. Agua (ml)
1	180	1	0	30
2	220	1	0	30
3	200	1	0	30
4	180	1	1	30
5	200	1	1	30
6	220	1	1	30
7	180	2	0	30
8	220	2	0	30
9	200	2	0	30
10	200	2	1	30
11	180	2	1	30
12	220	2	1	30
13	220	2	2	30
14	220	2	0.5	30
15	200	2	2	30

16	200	2	0.5	30
17	200	2	1	20
18	220	2	1	20
19	200	2	1	10
20	220	2	1	10

A continuación se muestran los perfiles operativos de la reacción a condiciones más severas (RX 13) y de la reacción a menores condiciones de severidad (RX 1), en donde se observa el comportamiento de la presión y temperatura durante el tiempo de reacción.

TABLA 2. Perfil operativo de la RX1 T: 180°C, t:1h, s/n catalizador, Vol. Agua: 30 mL

REACCIÓN 1			
Θ (h)	T (°C)	P (bar)	RPM
0.0000	22.3	10	0
0.0667	50	12.5	50
0.1000	100	15	50
0.1333	150	15	50
0.1500	180	17.5	50
0.1667	180	17.5	400
0.2000	218.5	20	400
1.1500	180	20	400
1.7500	36.2	13	0

En la tabla 2 se muestra la actividad de la temperatura y presión de la reacción, se puede ver que tarda 9 min en llegar al set point (línea en color verde claro) de 180°C y hubo un aumento breve a 218.15°C con 20 bar tras incrementar la agitación a 400 rpm, este incremento se visualizo en todas las corridas lo que no fue preocupante debido a que los valores del set point no tardaban en estabilizarse a los valores predeterminados; como se puede ver en la hora a la que finalizo el tiempo de reacción el valor de temperatura terminó en 180°C (línea color rojo).

TABLA 1. Perfil operativo de la RX13 T: 220°C, t:2h, H₂SO₄: 2% p/p, Vol. Agua: 30 mL

REACCIÓN 13			
Θ (h)	T (°C)	P (bar)	RPM
0.0000	26.3	10	0
0.0167	26.4	10	50
0.0833	50	10	50
0.1333	100	12	50
0.1500	150	15	50
0.1833	200	16	50

0.2000	220	19	50
0.2167	230	23	400
0.2833	225.5	20	400
0.5333	218	21	400
0.7833	220	22	400
1.2000	219.5	24	400
1.7833	220	24	400
2.2000	220	25	400
2.5833	88	15	50
2.8167	45	13	0

En la reacción 13 de la tabla 3 se puede observar que alcanzó el set point de 220 °C en 12 min y mantuvo una isoterma de aproximadamente 120 min a 21–25 bar, con un pico transitorio a 230 °C al incrementar la agitación.

3.2. Espectroscopía de infrarrojo a muestras de reacción

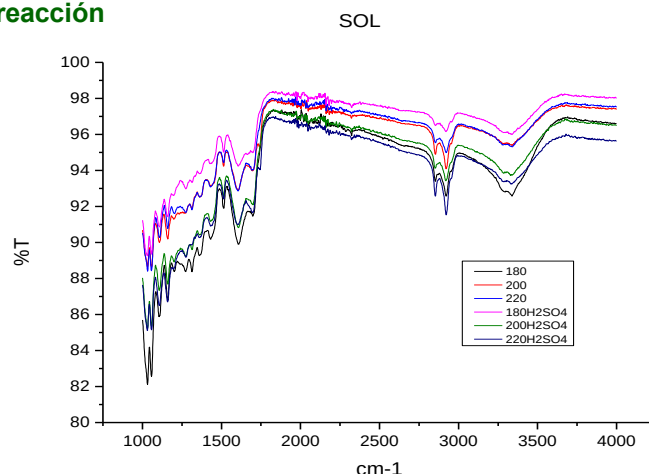


FIGURA 2. Espectro FTIR de primera serie de reacciones a un tiempo de 1h con catalizador al 1% p/p y sin catalizador a las tres diferentes temperaturas con 30ml de agua.

En los espectros FTIR de las reacciones con H₂SO₄, las bandas de C=O ~1700 cm⁻¹ aparecen más pronunciadas que en las sin ácido a 1 h, por lo que el catalizador acelera hidrólisis/oxidación leve generando carbonilos a tiempo corto.

Por otro lado las bandas a 1200–1000 cm⁻¹ (C–O) y 3400–3200 cm⁻¹ (O–H) se aprecian menos profundas conforme sube la T y con ácido, indicando pérdida de grupos oxigenados desde la primera hora de reacción.



A 1 h, el ácido ya denota una inclinación más a C=O transitorio y menor O-H/C-O, lo que puede representar una mayor carbonización si se prolonga el tiempo de reacción.

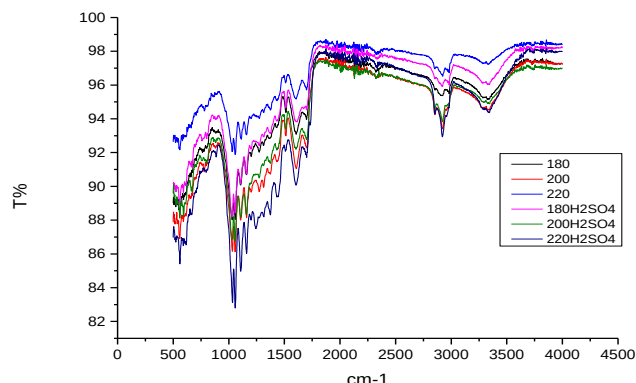


FIGURA 3. Espectro FTIR de segunda serie de reacciones a un tiempo de 2h con catalizador al 1% p/p y sin catalizador a las tres diferentes temperaturas con 30ml de agua.

Para una misma T, al pasar de 1 h a 2 h disminuye notablemente O-H y C-O; el sólido queda más desoxigenado.

El tiempo consolida la aromatización que se ve en bandas alrededor de 1600 cm⁻¹ y la desoxigenación.

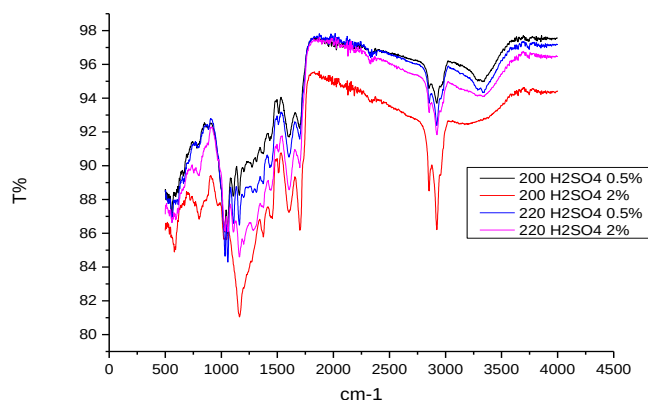


FIGURA 4. Espectro FTIR de tercera serie de reacciones a un tiempo de 2h con catalizador H₂SO₄ al 0.5% y 2% a las temperaturas de 200°C y 220°C con 30ml de agua.

La comparación entre diferentes porcentajes de concentración llevó a ver que al pasar de 0.5 % a 2 % de concentración de catalizador se atenúan los grupos O-H y C-O ; el grupo C=O muestra el patrón más rápido para la descarboxilación a una concentración del 2 % por lo que el ácido acorta el camino hacia la descarboxilación.

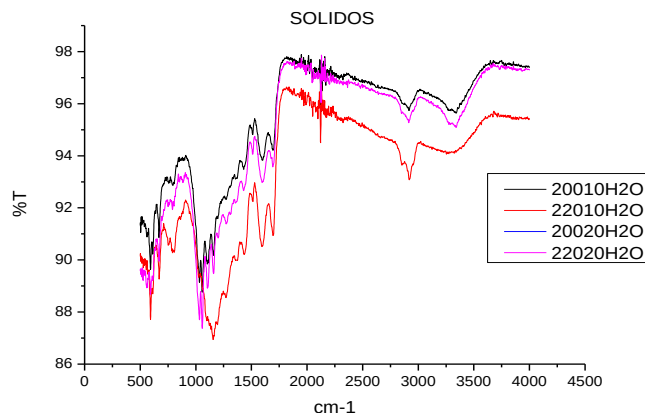


FIGURA 5. Espectro FTIR de cuarta serie de reacciones a un tiempo de 2h con H₂SO₄ al 1% a las temperaturas de 200°C y 220°C con volúmenes de 20 y 10 mL de agua.

A menor volumen de agua, suelen verse espectros más con menos profundidad en sus bandas de O-H y C-O y con mayor carácter aromático. Por lo tanto a volúmenes mayores se nota que permanecen más compuestos C-O y C=O .

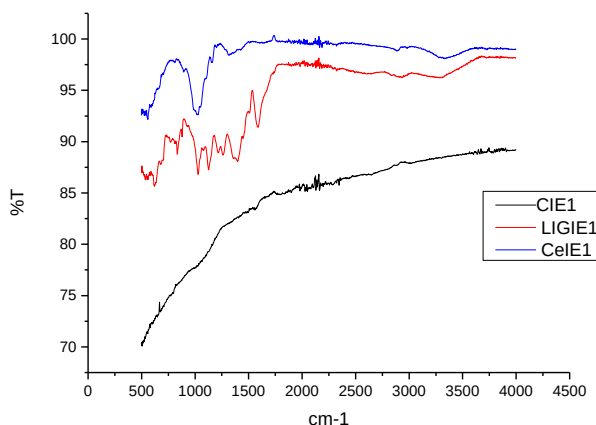


FIGURA 6. Espectro FTIR de muestras de carbón, lignina y celulosa.

Se analizaron muestras de celulosa, lignina y carbón en comparación con estos espectros las muestras de los sólidos de las reacciones pierden la firma “celulósica” (1160–1030 cm⁻¹, 3300 cm⁻¹) y presentan rasgos más similares a los tipo lignina/carbón.

3.3. Carbón orgánico no purgable en muestras líquidas (NPOC)



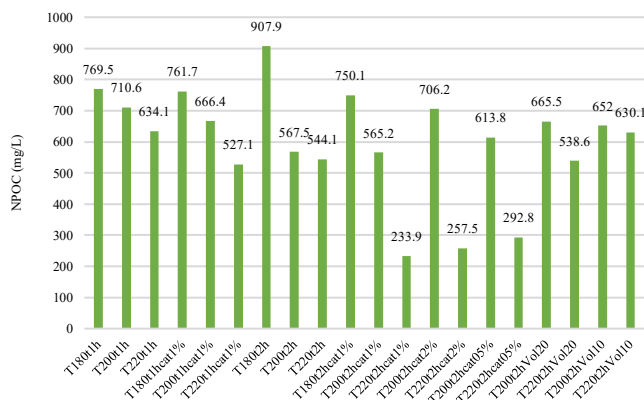


FIGURA 7. Carbón Orgánico No Purgable (NPOC).obtenido en las muestras líquidas de reacción.

Como efecto de la temperatura se estudió el tiempo de reacción de 1 h y el contenido de NPOC cae al subir la temperatura ($180 > 200 > 220$ °C). Esto puede dar indicios de que a mayor T° pueden existir reacciones que sacan el carbono de la fase líquida

La acidez actúa diferente con respecto a la temperatura, a 200 °C la acidez incrementa la concentración de NPOC en el extremo (2 %), en cambio a 220°C cualquier concentración de catalizador mantiene niveles bajos de NPOC, incluso al 2% no logra elevar los niveles por lo que podría decirse que predominan reacciones que sacan el carbono de la fase líquida.

3.4. Carbón orgánico total en muestras sólidas (COT)

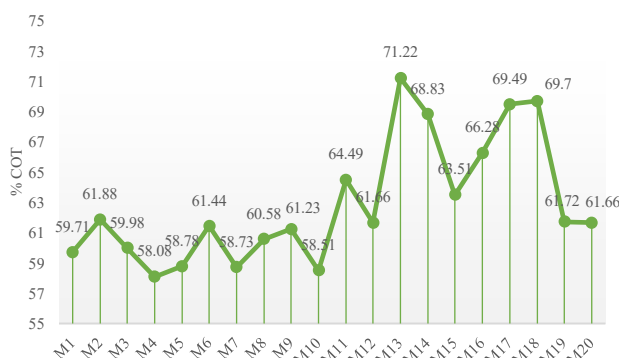


FIGURA 8.Porcentaje de carbón Orgánico Total en muestras sólidas de la reacción

A un tiempo de reacción de 1h, el %COT crece levemente con el aumento de la temperatura, a 2 h, el incremento con T

es más marcado ($180 < 200 < 220$ °C; $M7 < M8 < M9$), en conjunto mayor temperatura y mayor tiempo de reacción es desplazan el sólido hacia un mayor porcentaje de carbón orgánico total.

En cuestión a la concentración de catalizador las concentraciones de 0.5% y 2% muestran promedios más altos de COT que a solo 1% . Con una temperatura de 220°C a 2h el pasar de 1% a 2% eleva el %COT desde un 61.66% hasta el porcentaje mas alto obtenido un 71.22% (RX 13)

Con una temperatura de 200 °C, 2 h, 0.5% (66.28%) rinde un %COT superior a 2% (63.51%) lo cual indica que hay un óptimo intermedio de acidez, pues el exceso puede solubilizar más carbono.

El máximo %COT aparece de forma consistente en 20 mL, sugiriendo que un volumen de agua intermedio favorece sobre el sólido (10 mL puede limitar transferencia; 30 mL puede “diluir” más carbono hacia la fase líquida dependiendo sus otras condiciones como temperatura y % de catalizador)

3.5. Turbidez de las muestras en la fase líquida.

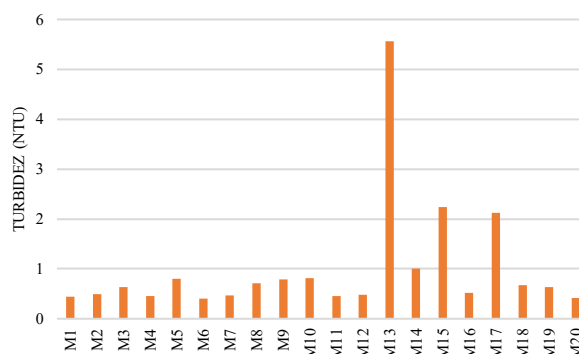


FIGURA 9. Turbidez (NTU) por cada muestra líquida de reacción

En un tiempo de reacción de 1–2 h, la temperatura de 200 °C tiende a maximizar la turbidez base; a 220 °C, con 1% de ácido, la turbidez baja (0.40–0.48), señal de mejor separación de fases/menos coloides con excepción a un porcentaje más alto de catalizador. La concentración mayor de catalizador tiene una ventaja que reduce la turbidez (a una temperatura de 220°C con un 1% de concentración y a 200°C con una concentración de 0.5%) en cambio el exceso de catalizador al 2% (RX 13) favorece la precipitación y la dispersión coloidal, elevando mucho la NTU.

Con 20 mL (volumen de agua) maximiza la turbidez en ambas temperaturas (pico claro a 200 °C; M17). A 10 mL, la



concentración del catalizador es alta pero la transferencia es menor; a 30 mL, hay más dilución y menos partículas visibles. El máximo pico para NTU fue el mismo que para el COT por lo que es coherente ya que se aceptan partículas más finas en el producto sólido induciendo así un alto NTU (a 220°C, 2h y 2% concentración de catalizador un 5.56 NTU).

4. CONCLUSIONES

Los resultados demuestran la viabilidad de producir biocarbón por vía hidrotérmica a partir de cáscaras frescas de naranja y plátano en condiciones moderadas (180–220 °C, 1–2 h, 0–2 % H₂SO₄, 10–30 mL/10 g), obteniendo biocarbón con 58–72 % C cuya estructura, según FTIR, evoluciona de una matriz rica en O–H/C–O hacia materiales más aromáticos y desoxigenados (1600 cm⁻¹ y 900–700 cm⁻¹; C=O en 1700 cm⁻¹ que decrece por descarboxilación) al aumentar la severidad; este patrón se correlaciona con la reducción de NPOC a 200–220 °C cuando se extiende a 2 h y con la turbidez de la fase líquida, que permanece baja (0.4–1.0 NTU) en 0–1 % H₂SO₄ pero se dispara con 2 % (2.24–5.56 NTU). Alta turbidez coincide con NPOC bajo o moderado en algunos casos y con FTIR del sólido más aromático y a severidad/ácido altos, parte del carbono se condensa como partículas finas (aumenta NTU) en lugar de permanecer disuelto (NPOC), y el sólido muestra mayor desoxigenación/aromatización.

La reacción 13 domina la severidad y explica que el máximo %C se logre en 220 °C, 2 h, 2 % H₂SO₄, 30 mL (71.22 % C), condición que prioriza la carbonización a costa de mayor turbidez; si se buscara un compromiso sólido-líquido, las condiciones 220 °C–2 h–1 %–20 mL, que mantiene alto %C (69.7 %) con turbidez moderada.

AGRADECIMIENTOS

S. Laurenas agradece a el Dr. I. Elizalde que facilitó la disposición de materiales, equipos y una asesoría constante para la correcta ejecución de este proyecto, también a la Dra. C. Reza y al Dr. R. Ramírez por facilitar el uso del equipo Perkin Elmer Spectrum Two FT-IR.

I. Elizalde agradece al proyecto CONACYT 274276 por la infraestructura facilitada. También se agradece al Ing. J. Ramírez-CMP+L por el soporte técnico para la realización de caracterización de muestras por COT-Sólidos.

REFERENCIAS

- [1]. N. Jiménez, *El residuo: producto urbano, asunto de intervención pública y objeto de la gestión integral*. Cultura y representaciones sociales, 11(22): 158-192 (2017). Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-81102017000100158&lng=es&tlng=es
- [2]. C. Muñoz, R. Morales, *Generación de residuos orgánicos en las unidades económicas comerciales y de servicios en la Ciudad de México*. Estud. demogr. Urbanos, 33:733-767 (2018). 10.24201/edu.v33i3.1804
- [3]. SEDEMA, *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México*. Autor (2023). Disponible en: https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/residuos/IRS_2023_Completo.pdf
- [4]. A. Rodríguez, *Análisis comparativo de los planes de gestión de residuos sólidos de Bogotá DC y de Ciudad de México*. Revistar Prod + Limpia, 17:111-135 (2022). 10.22507/pml.v17n1a7
- [5]. L. Romero, *México carece de una gestión integral de residuos sólidos urbanos*. Gaceta UNAM, 14 de agosto (2023). Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/mexico-carece-de-una-gestion-integral-de-residuos-solidos-urbanos/>
- [6]. SEDEMA, *Residuos sólidos*. Autor. (2025). Disponible en: <https://sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/residuos-solidos>
- [7]. CDMX *Planta de Carbonización Hidrotermal*. Autor. (2022). Disponible en: <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/planta-de-carbonizacion-hidrotermal-2/>
- [8]. Redacción, *UNAM y CFE Inauguran primer módulo de la planta de carbonización hidrotermal*. Aristegui, 24 de diciembre (2024). Disponible en: <https://aristeginoticias.com/2612/mexico/unam-y-cfe-inauguran-primer-modulo-de-la-planta-de-carbonizacion-hidrotermal/>
- [9]. K.-Q. Tran, Chapter 10 - *Process Intensification and Process Integration for Hydrothermal Processing of Forest Residues and Agricultural Wastes*. T. Bhaskar, A. Pandey, S.V. Mohan, D.-J. Lee, S.K. Khanal (Eds.), Waste Biorefinery, Elsevier, 299-322, (2018). 10.1016/B978-0-444-63992-9.00010-0
- [10]. S. Mazhkoo, S. Soltanian, H. Odebiyi, O. Norouzi, M. Ubene, A. Hayder, O. Pourali, R. Santos, R. Brown, A. Dutta, *Process intensification in hydrothermal liquefaction of biomass: A review*. J Envir Chem Eng, 13(2): 115722. 10.1016/j.jece.2025.115722





Construcción y evaluación de un biodigestor anaerobio tipo batch para la producción de biogás

NEO SILVA-TÉLLEZ¹, CHRISTIAN OLVERA-LÓPEZ¹, MARIANA K. HERNÁNDEZ-ESCALANTE¹, SERGIO A. MEDINA-MORENO², ANGÉLICA JIMÉNEZ-GONZÁLEZ² y ROGELIO PÉREZ-CADENA¹

¹Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, Tolcayuca, Hidalgo, C.P. 43860, México.

²Departamento de Biotecnología, Universidad Politécnica de Pachuca. Ex-Hacienda de Santa Bárbara, Carr. Pachuca Cd. Sahagún Km. 20, Zempoala, Hidalgo, C.P. 43830, México

Autor de Correspondencia: R. Pérez-Cadena (e-mail: roperez@upmh.edu.mx).

RESUMEN Los biodigestores son dispositivos donde se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia. El diseño de estos sistemas depende de los recursos disponibles y la tecnología existente. En el presente trabajo se realizó el diseño, construcción y operación de un biodigestor tipo batch con instrumentación y control para la producción de biogás. El biodigestor de 38 L se diseñó con geometría estándar en SolidWorks e incluyó sensores y actuadores. La construcción se realizó en lámina de acero inoxidable. Se integraron sensores como el MQ-4 para la medición de metano y un electrodo de vidrio para el monitoreo del pH. Los datos obtenidos fueron gestionados por microcontroladores Arduino y transmitidos a una base de datos en Excel. Se implementaron sistemas de control de temperatura y agitación para asegurar condiciones estables de operación. El biodigestor operó al 50% de su capacidad durante 30 días, evaluando dos relaciones sustrato-inóculo con temperatura constante de 35°C y agitación intermitente a 15 rpm. En la relación 50% estiércol:50% inóculo, se registró una baja producción de metano, alcanzando un máximo de 965 ppm, equivalente al 15.91% v/v de metano. Adicionalmente se observó un aumento de pH durante los primeros 7 días seguido de una disminución y estabilización al final del proceso. Por otro lado, la relación 70% estiércol:30% inóculo se alcanzó una concentración máxima de metano de 4280 ppm, equivalente al 71% v/v de metano, superando el umbral mínimo para biogás de calidad energética. Los resultados mostraron que una proporción adecuada de sustratos es necesaria para mejorar la digestión anaerobia.

PALABRAS CLAVE: Biodigestión, Geometría estándar, Biogás, Instrumentación.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los combustibles convencionales a base de petróleo son una constante preocupación, debido a las afectaciones tanto al medio ambiente, como a la salud de la población [1]. En el año 2021, México aportó 714 millones de toneladas de CO₂ equivalente al 1.4% de las emisiones de gases de efecto invernadero, donde los principales gases contaminantes fueron el dióxido de carbono y el metano [2].

Una alternativa que puede sustituir a los combustibles fósiles y mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es la digestión anaeróbica (DA), un proceso que se ha consolidado como una solución efectiva para el tratamiento de residuos orgánicos, permitiendo la generación de energía renovable [3]. La DA es un proceso que degrada la materia orgánica en ausencia de oxígeno a través de una serie de etapas realizadas por diferentes grupos de microorganismos, hasta metano y digestato. Este último, es una fuente rica en nutrientes, aportando materia orgánica y minerales esenciales al suelo [4, 5].

El biogás está compuesto principalmente por metano (50-85%) y dióxido de carbono (25-45%), con pequeñas cantidades de otros compuestos como oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno [6]. Para mejorar la digestión anaeróbica a partir de residuos orgánicos y aumentar la producción de biogás, es necesario optimizar variables como: La relación carbono-nitrógeno, temperatura, pH, pretratamientos de la materia prima,





mezclado, concentración de inóculo y tipo de reactor utilizado [7].

Debido a que algunos sustratos pueden tener comportamientos inhibidores dentro del proceso de DA, la determinación de parámetros como sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST), contenido de nitrógeno y demanda química de oxígeno (DQO) son necesarios, para evaluar la biodegradabilidad del sustrato y su potencial conversión a metano [8].

El biodigestor es un sistema en el cual se depositan residuos orgánicos que al descomponerse en condiciones anaeróbicas llevan a la producción de biogás [9]. Estos dispositivos suelen tener diferentes formas, como: cilíndrica, cúbica y ovoide principalmente; con diseños que contemplan cubiertas flotantes o fijas [10]. En cuanto a la operación, los sistemas de DA semicontinuos son los más usados en el medio rural, suelen estar enterrados, lo que favorece su carga por gravedad produciendo una cantidad más o menos constante de biogás al mantener las condiciones de operación [11].

Sin embargo, este tipo de biodigestores no tienen siempre un funcionamiento estable, ya que tienen limitaciones para mantener las condiciones térmicas adecuadas, especialmente en climas fríos, lo que lleva a una producción discontinua o insuficiente de biogás [10]. La transición hacia tecnologías energéticas sostenibles, como el uso de biodigestores, depende de superar las barreras que limitan la adopción y eficiencia de los biodigestores a pequeña escala en entornos rurales [9, 12]. Por otro, se ha reportado que la implementación de sistemas de automatización y control ha mostrado resultados satisfactorios en la reducción de materia orgánica y la maximización de la producción de biogás, lo que evidencia el potencial de esta tecnología para ser implementada en biodigestores a gran escala [13].

Los principales desafíos que enfrentan los biodigestores incluyen la sedimentación, y la capacidad de mezcla limitada [14]. Debido a que en la DA de estiércol, la reología del fluido impacta en el diseño de un sistema de mezclado [15]. En este sentido, el mezclado intermitente en los biodigestores tiene ventajas como: La mejora en la producción de biogás, la estabilidad del proceso y la remoción de SV [16]. Adicionalmente, el uso de sensores y dispositivos electrónicos resulta esencial para supervisar y regular el proceso. La medición del pH permite evaluar la estabilidad química del biodigestor y prevenir condiciones que puedan inhibir la actividad biológica [17]. La temperatura, es un factor crítico en la DA, ya que debe mantenerse en un rango óptimo mediante el uso de sensores

térmicos y sistemas de control [18]. Asimismo, la integración de actuadores como relés y sistemas de calefacción permite realizar ajustes automáticos para optimizar el desempeño del biodigestor. En el presente trabajo se realizó el diseño, construcción y operación de un biodigestor anaerobio tipo batch con instrumentación para el monitoreo y control de variables clave en la producción de biogás.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño del biodigestor

El biodigestor se diseñó con un volumen nominal de 38 L. A este, se le incorporó un sistema de agitación basado en una geometría estándar con una relación $H/D_t = 2$ (Tabla 1) [19]. A partir de los datos de geometría estándar, se realizaron bocetos isométricos y modelos tridimensionales de los componentes del biodigestor en SolidWorks. En el biodigestor se incluyeron las conexiones de entrada y salida de gases, así como las válvulas de carga y descarga de lodos. Para mantener las condiciones herméticas se usaron pegamentos adhesivos de alta resistencia y soldaduras. Los componentes de medición y sensores se ubicaron, respetando los volúmenes definidos para la digestión y el espacio de almacenamiento de biogás.

TABLA 1. Proporciones geométricas para el biodigestor [19].

Agitador	Relaciones geométricas			
Impulsor tipo Rushton	$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$	$\frac{H}{D_t} = 2$	$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$
	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$	

Dt: Diámetro del tanque, Da: Diámetro de las palas, H: Altura del fluido, J: Ancho de placas deflectoras, C: distancia del fondo al impulsor, L: Largo de las palas, W: Ancho de las palas.

2.2. Instrumentación del biodigestor

El sistema de agitación tipo Rushton incorporado al biodigestor se ensambló a un motor de corriente directa (Hilitan®), alimentado con una fuente conmutada de 12V y 3A (Keenso®). Los pulsos de activación del motor se controlaron con un módulo de relé con temporizador (Acouto®). Para el sistema de control de temperatura, se utilizó una placa calefactora de 140 W a 110 V de corriente alterna (CA) (Evgatsauto®). La temperatura fue controlada con un termostato digital (Fafeicy®) el cual controla una resistencia cerámica con un relé de estado sólido (Hilitand®), acoplada a un sensor termopar tipo K (Yanmis®).

Para la detección del pH, se utilizó un sensor colocado a 15 cm con respecto a la base del biodigestor. El sensor de gas metano MQ-4 se colocó sobre la tapa del reactor para asegurar





su contacto con la cámara de almacenamiento de gases. Tanto los valores de pH como de concentración de gas metano se mostraron en tiempo real por medio de pantallas LCD, conectadas a módulos Arduino. Toda la electrónica fue colocada en un gabinete para garantizar su funcionamiento y durabilidad.

2.3. Programación de componentes

Para la operación del biodigestor, se desarrollaron los códigos de programación de los sensores de pH y metano, además de la programación y configuración del REX C100 para el control de temperatura.

Para la calibración del dispositivo MQ-4, se inició con la determinación del factor de corrección mediante la curva de calibración del fabricante [20]. Se programó un Arduino Uno R3 en C++, incluyendo el factor de corrección para la lectura precisa de señales analógicas del sensor. La tarjeta Arduino se conectó a una pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C (DFRobot, China) mediante los pines SDA y SCL de la pantalla LCD al Arduino respectivamente, con alimentación a 5V y GND del Arduino, mostrando las lecturas de metano corregidas. Finalmente, se verificó el código y se realizó el montaje físico de los componentes, utilizando cable calibre 22 AWG.

Para el desarrollo del control y lectura de pH, se utilizó un sensor de pH-4502C (DFRobot, China) calibrado con soluciones buffer, conectado al pin analógico A0 del Arduino Uno R3. Los pines de alimentación del sensor se conectaron a 5V y GND del Arduino, respectivamente [21]. La tarjeta Arduino se conectó a una pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C mediante los pines SDA y SCL, con una alimentación a 5V y GND, mostrando las lecturas de pH corregidas [22].

2.4. Transmisión de datos en línea

La programación en Arduino se centró en la emisión de los datos a través del puerto serie, utilizando las funciones Serial.print() para enviar los valores numéricos y Serial.println() para añadir un salto de línea entre lecturas [23]. La adquisición de datos en la plataforma digital se configuró para la comunicación en serie a una velocidad de 9600 baudios [24].

2.5. Caracterización fisicoquímica de sustratos

Para la caracterización fisicoquímica tanto del estiércol como del inóculo obtenido de una planta tratadora de aguas residuales (PTAR), se utilizaron métodos estándar. El pH se determinó por el método electrométrico. La determinación de ST se realizó siguiendo la metodología estándar a una temperatura de entre 103 a 105°C durante una hora. La

demanda química de oxígeno (DQO) se determinó por absorbancia usando una curva de calibración con hidrogenofofato de potasio. Los SV se determinaron calcinando el residuo en un horno de mufla a 550 °C durante 1h [25]. El N-NH₄ se determinó por espectrofotometría [26].

El biodigestor operó al 50% del volumen nominal, a 35 °C, con una agitación intermitente a 15 rpm y condiciones anaeróbicas mediante el cambio de atmósfera con gas nitrógeno. Por otro lado, la relación C: N se ajustó a un valor de 23 kg C/kg N. Las variables de respuesta medidas fueron los cambios de pH y la concentración de metano. Para determinar la funcionalidad del biodigestor se realizó una variación de la relación sustrato-inóculo de 50:50% y 70:30% respectivamente. La operación en lote fue de 30 días registrando datos cada 10 minutos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Diseño del biodigestor

El biodigestor tipo batch fue construido con volumen nominal de 38 L con diseño cilíndrico y fondo plano. Las dimensiones fueron de 57.84 cm de alto (H) y un diámetro (Dt) de 28.92 cm. En este caso la relación geométrica H/Dt se estableció en dos para mantener un volumen suficiente para la digestión y el almacenamiento de biogás (Figura 1). En trabajos previos, se ha descrito una relación H/Dt de 1.5 [27]. Mientras que en la conversión de sustrato de bovino en un digestor de cúpula fija con una relación H/Dt de 2 y un porcentaje de llenado del 60%, no se reportaron efectos sobre la producción de biogás con respecto a la geometría [28].

Por otro lado, en un estudio sobre la influencia de la relación altura-diámetro de un biodigestor para la biometanización de residuos vegetales se demostró mediante un análisis estadístico que dicha influencia no fue estadísticamente significativa [29]. Sin embargo, se ha reportado que la geometría vertical requiere sistemas de agitación, por lo que una mezcla adecuada es necesaria para mejorar el contacto entre el sustrato y el consorcio bacteriano, lo que aumenta la producción de biogás [30].



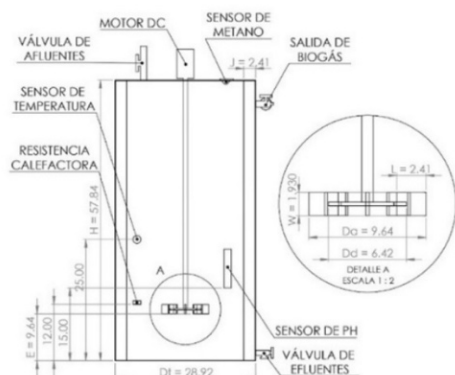


FIGURA 1. Diseño del biodigestor Batch con distribución de sensores y accesorios necesarios para la DA.

En este trabajo, el biodigestor tipo batch se mantuvo en agitación a bajas rpm con intermitencias cada 30 min durante el día, mediante dispositivos de control automático. Al respecto, se ha reportado que los agitadores pueden funcionar de forma continua o en secuencias, las cuales se pueden escalar empíricamente en función al tamaño del tanque, las características del sustrato y la tendencia a formar capas flotantes [31].

Para el monitoreo y control del biodigestor, se realizó la programación tanto del sensor MQ-4 como del sensor de pH en el entorno Arduino IDE, empleando el lenguaje C++ [32]. La señal analógica del sensor MQ-4 permitió medir la concentración de metano en partículas por millón (ppm) [20]. Adicionalmente, se colocó un sistema de medición y alerta de metano a través de un zumbador, programado para emitir una respuesta cuando la concentración de metano superaba los 6000 ppm.

3.2. Características fisicoquímicas del sustrato para la biodigestión.

Previo a la digestión de los lodos del PTAR y el estiércol en el biodigestor, así como las mezclas para la biodigestión, se realizó una caracterización fisicoquímica de estos, donde se analizaron parámetros como ST, SV, DQO, pH y N-NH₄ en el sustrato, inóculo y la mezcla (Tabla 2).

TABLA 2. Características fisicoquímicas del sustrato e inóculo.

Parámetro	Estiércol	Inóculo	Relación 50:50	Relación 70:30
pH	7.2	7.3	6.2	5.9
ST (% p/p)	19.08 ± 0.86	2.93 ± 0.25	8.16 ± 0.41	9.75 ± 0.54
SV (% p/p)	93.11 ± 0.06	2.41 ± 0.49	62.52 ± 2.56	75.76 ± 3.02
DQO (mg/L)	519 ± 12.3	450 ± 11.7	nd	nd
NH ₄ -N (mg/L)	92.27 ± 0.03	35 ± 2.7	nd	Nd

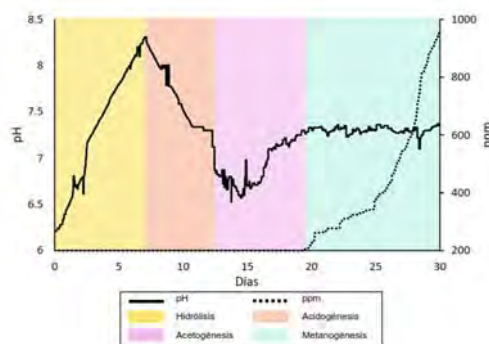
Se observó que el estiércol vacuno, mostró una concentración de nitrógeno amoniacal de 92.27 mg NH₄-N/L antes de la digestión. En resultados previos se han reportado

valores similares para el estiércol de vaca con 88.2 mg NH₄-N/L [33]. Adicionalmente se ha observado que concentraciones de amonio de 50 a 200 mg NH₄-N/L son benéficas para la DA y aporta los nutrientes necesarios para los microorganismos [34].

Se determinó que el pH del estiércol vacuno antes de la carga del biodigestor fue de 7.2 mientras que el pH del inóculo fue de 7.3. Resultados similares han sido reportados con pH de 7.45 [33]. Por otro lado, se ha reportado que el pH del afluente de una PTAR se encuentra entre 6 y 8 [35]. En este sentido, durante el proceso de DA los valores de pH no deben ser menores a 6.0 ni mayores a 8.0, para evitar la inhibición del proceso de DA [10].

En cuanto a la cantidad de ST, se determinó que el estiércol contenía un 19.08% p/p. Este valor indicó que el estiércol vacuno tiene el potencial para llevar a cabo un proceso de DA en estado sólido [36]. Por otro lado, la concentración de ST fue de 8.16% p/p para la relación 50:50 y 9.75% p/p para la relación 70:30 (Tabla 2). Estos valores estuvieron en el un intervalo del 8% al 12% p/p de ST para asegurar el buen funcionamiento del proceso de DA en fase líquida [12, 37].

La cantidad de SV para la relación 50:50 resultó en 62.52% p/p, mientras que en la relación 70:30 mostró un valor de 75.76% p/p. El aumento de SV y ST para la relación 70:30 puede ser originado por una relación sustrato-inóculo mayor, debido a que relaciones sustrato-inóculo mayores presentan más contenido de sólidos permitiendo una mayor carga orgánica dentro del biodigestor [38]. Ambos valores de SV obtenidos en la caracterización se encontraron por encima del valor adecuado de 50% p/p reportado, para que se lleve a cabo la producción de metano [39].



3.3. Efecto de la relación sustrato-inóculo en la producción de metano.

Durante el periodo de operación del biodigestor se monitoreó tanto los valores de pH como la concentración de gas metano

en ppm para cada relación de carga del biodigestor estudiado. Mediante lecturas automáticas cada 10 minutos por un periodo de 30 días se obtuvieron aproximadamente 17,000 datos entre valores de pH y producción de metano en ppm para cada carga evaluada dentro del reactor.

Para la relación sustrato-inóculo 50:50, el pH inicial fue de 6.2 y presentó aumento durante los primeros días, alcanzando un valor máximo de 8.31 en el día 7; mientras que para la relación sustrato-inóculo 70:30, el pH inicial de 5.9 experimentó un aumento durante los primeros días, alcanzando un valor máximo de 8.49 (Figura 2).

FIGURA 2. Datos de pH y metano para la relación sustrato-inóculo 50:50.

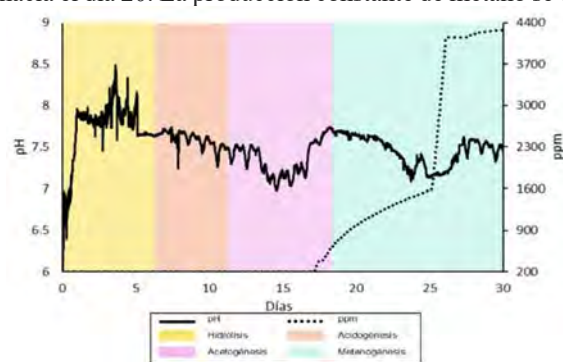
El aumento de pH durante los primeros días de DA pudo haber sido causado por la acumulación de amoníaco libre, lo cual indicó actividad de microorganismos hidrolíticos [40]. Se ha reportado que un pH como el registrado en este estudio favorece la degradación eficiente de celulosa, hemicelulosa, lignina y proteínas [41]. Sin embargo, es posible una acumulación de amoníaco libre originada a partir de la hidrólisis de proteínas, como ocurre en el estiércol vacuno [42].

En el presente trabajo, se observó que el mantenimiento de condiciones mesófilas (35 °C) durante la etapa de hidrólisis pudo haber favorecido la conversión de amonio a nitrógeno amoniacal [43]. En ambos experimentos realizados, se observó una disminución progresiva de pH hasta el día 15 lo cual podría atribuirse a la formación de AGV como productos intermedios generados por la acción de bacterias acidogénicas [44]. Resultados similares se han reportado al operar un biodigestor de 50 L con estiércol de vaca como sustrato [45].

En ambas relaciones evaluadas, 50:50 y 70:30, tras la fase inicial de inestabilidad, el pH del sistema se estabilizó dentro de rangos para el desarrollo de la DA. En la relación 50:50, los valores de pH se mantuvieron entre 6.8 y 7.4, mientras que en la relación 70:30 oscilaron entre 7.1 y 7.6 (Figura 3). Aunque estos valores se encuentran ligeramente por encima del intervalo óptimo reportado para la etapa metanogénica (pH cercano a 7) [46]. Otros autores han señalado que estos niveles no necesariamente afectan de forma negativa el proceso, debido a que el aumento en el contenido de amoníaco libre puede compensar dichas variaciones de pH [47]. Adicionalmente, se ha reportado que, un incremento del pH de entre 0.6 y 1.3 unidades puede elevar la concentración de amoníaco libre entre 3 y 18 veces [48].

La producción de metano para la relación sustrato-inóculo 50:50 inició en el día 20 y se mantuvo hasta el día 30, con un incremento en la concentración de metano de 200 a 965 ppm (Figura 2). La baja concentración de metano pudo estar

asociado al pH, ya que el potencial de inhibición de las bacterias metanogénicas se incrementa debido a la acumulación de amoníaco no ionizado [49]. Además, se ha reportado que una baja producción de acetato por parte de las bacterias acetoclásticas limita la formación de metano [50]. En contraste, se observó que la producción de metano en la relación sustrato-inóculo 70:30 comenzó después del día 17, mostrando un aumento progresivo desde 200 ppm hasta alcanzar un máximo de 4280 ppm. En comparación con la relación 50:50, el incremento de metano fue notable, alcanzando la misma concentración inicial de la primera carga hacia el día 20. La producción constante de metano se observó



a partir del día 25, aumentando la concentración de 1600 a casi 4000 ppm en dos días de operación.

FIGURA 3. Datos de pH y metano para la relación sustrato-inóculo 70:30.

Para cuantificar la calidad del biogás producido, se determinó una constante de proporcionalidad (0.01659), el cual permitió convertir las lecturas del sensor en una estimación del contenido de metano en el volumen del biodigestor. A partir de la constante, se determinó que la concentración máxima de metano para la relación sustrato-inóculo 50:50 fue de 15.91 % v/v mientras que, para la relación 70:30 alcanzó una concentración significativamente mayor, llegando a 71% v/v. Este valor fue superior a lo reportado en la composición de biogás [6]. Resultados similares fueron reportados previamente usando el sensor MQ-4, obteniendo concentraciones de metano de hasta 76.961% v/v [20]. De igual forma, se ha reportado una concentración de metano de 59.34% v/v, para un tiempo de residencia hidráulico de 30 días [51]. Mientras que en procesos de co-digestión del estiércol vacuno mayor al 50%, se puede lograr una producción de metano superior al 45% v/v [39].

5. CONCLUSIONES



A partir del biodigestor batch se realizó el seguimiento en tiempo real de la concentración de metano en el biogás y el pH en el medio de DA mediante el sensor MQ-4 y el electrodo de pH programado en Arduino. Adicionalmente, la implementación del sistema de control de agitación y temperatura permitieron mantener las condiciones estables durante el proceso de DA. La operación del biodigestor mostró un aumento del pH en los primeros días de DA, causado probablemente por la acumulación de nitrógeno amoniacal durante la hidrólisis, prolongando el tiempo de degradación de la materia orgánica. Para la relación 50:50 inóculo-sustrato se observó una digestión incompleta con una producción de metano de 965 ppm (15.91% v/v) en el día 30. En contraste, la relación sustrato-inóculo 70:30 logró una producción de metano de 4280 ppm (71% v/v). Esto demostró que mantener una proporción adecuada de sustratos-inóculo es importante para maximizar la producción de biogás.

REFERENCIAS

- [1] A. E. M. van den Oever, G. Cardellini, B. F. Sels, and M. Messagie, "Life cycle environmental impacts of compressed biogas production through anaerobic digestion of manure and municipal organic waste," *J. Clean. Prod.*, vol. 306, p. 127156, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127156.
- [2] M. A. Ramírez Lara and J. J. Li Ng, "México | Emisiones y fuentes de los Gases de Efecto Invernadero," 2024. [Online]. Available: <https://www.bbvaresearch.com/wp-content/uploads/2024/01/2024-Emisiones-y-fuentes-GEI-Mexico.pdf>
- [3] N. Malet, S. Pellerin, R. Girault, and T. Nesme, "Does anaerobic digestion really help to reduce greenhouse gas emissions? A nuanced case study based on 30 cogeneration plants in France," *J. Clean. Prod.*, vol. 384, p. 135578, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135578.
- [4] IDAE, *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid, 2007. [Online]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf
- [5] J. Ariunbaatar, A. Panico, G. Esposito, F. Pirozzi, and P. N. L. Lens, "Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste," *Appl. Energy*, vol. 123, pp. 143–156, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.02.035.
- [6] I. Amez Arenillas, "Estudio experimental de la inflamabilidad de mezclas gaseosas de CH₄, H₂ y CO₂ en aire y su potencial energético," Universidad Politécnica de Madrid, 2022.
- [7] S. Cisneros de la Cueva, F. Veana Hernández, M. A. Arjona López, C. L. Álvarez Guzmán, and S. B. Pérez Vega, "Optimization of variables from the anaerobic digestion process of cheese whey in biogas production," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 37, pp. 307–318, May 2021, doi: 10.20937/RICA.53879.
- [8] M. R. Atelge et al., "A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery," *Fuel*, vol. 270, p. 117494, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117494.
- [9] S. G. Sainz and C. E. C. Yanes, "Universidad de Ciencias Pedagógicas Elaboración de un biodigestor a escala de laboratorio Autora:," Universidad de Ciencias Pedagógicas, 2020.
- [10] V. García Páez, "Manual de biogás. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos. Direccion de Sustentabilidad," Buenos Aires, Argentina, 2019.
- [11] M. F. Garzón Cuji, "Estudio de un biodigestor generador de gas metano mediante abono orgánico para prácticas de energías alternativas en el laboratorio de la facultad de ingeniería civil y mecánica de la universidad técnica de Ambato," Universidad Técnica de Ambato, 2011.
- [12] J. Martí-Herrero, *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación.*, vol. 53, no. 9. 2008. doi: 10.13140/RG.2.1.1048.6242.
- [13] C. de Souza Guimarães and D. R. da Silva Maia, "Development of Anaerobic Biodigester for the Production of Biogas Used in Semi-Continuous System Bioprocesses: An Efficient Alternative for Co-Digestion of Low Biodegradability Biomass," *Biomass*, vol. 3, no. 1, pp. 18–30, Jan. 2023, doi: 10.3390/biomass3010002.
- [14] M. J. Barasa Kabeyi and O. A. Olanrewaju, "Optimum Bio-digester Design and Operations," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Michigan, USA: IEOM Society International, Jul. 2022, pp. 3163–3163. doi: 10.46254/EU05.20220424.
- [15] S. Panigrahi and B. K. Dubey, "A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste," *Renew. Energy*, vol. 143, pp. 779–797, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.040.





- [16] S. A. F. Leite, B. S. Leite, D. J. O. Ferreira, B. E. L. Baêta, and J. V. H. Dangelo, "The effects of agitation in anaerobic biodigesters operating with substrates from swine manure and rice husk," *Chem. Eng. J.*, vol. 451, p. 138533, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.138533.
- [17] G. R. Moncayo, "Control de proceso en biodigestores - Biodigestores - plantas de biogas - generadores - energia," 2017. <https://www.aqualimpia.com/control-biodigestores/>
- [18] K. Hagos, J. Zong, D. Li, C. Liu, and X. Lu, "Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, no. November, pp. 1485–1496, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.184.
- [19] P. M. Doran, *Bioprocess Engineering Principles*, 2nd ed. 2013.
- [20] J. A. Tovar-Sánchez, J. F. Arias-Molina, H. A. Milquez-Sanabria, and M. A. Mayorga-Castellanos, "Diseño técnico de un sistema de cuantificación de metano portable y de bajo costo," *Ingeniería*, vol. 28, no. Suppl, p. e19053, Feb. 2023, doi: 10.14483/23448393.19053.
- [21] R. Lozano, "¿Como usar modulo PH-4502 con arduino?," 2023. <https://www.taloselectronics.com/blogs/tutoriales/como-usar-modulo-ph-4502-con-arduino>
- [22] D. Parida, "Medidor de pH Arduino casero con sensor de pH de gravedad," May 2020. <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-ph-meter>
- [23] Microsoft, "¿Qué es el Transmisor de datos? - Soporte técnico de Microsoft," 2021. <https://support.microsoft.com/es-es/office/-qué-es-el-transmisor-de-datos-1d52ffce-261c-4d7b-8017-89e8ee2b806f>
- [24] S. A. G. Castaño, "Comunicación Serial con Arduino," 2019. <https://controlautomaticoeducacion.com/sistemas-embebidos/arduino/comunicacion-serial-con-arduino/>
- [25] APHA, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," American Public Health Association, Ed., 23 Edition. Washington DC, 2017.
- [26] L. Guo, S. Yang, J. Su, K. Zhang, T. Huang, and G. Wen, "Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low nutrient conditions by a newly isolated bacterium, *Acinetobacter* sp. SYF26," *Microbiology*, vol. 161, no. 4, pp. 829–837, Apr. 2015, doi: 10.1099/mic.0.000047.
- [27] D. B. Bahmaei, Y. Ajabshirchi, S. Abdollahpour, and S. A. Mehdizadeh, "Optimization of the Mixing in a Gas-lift Anaerobic Digester of Municipal Wastewater Sludge," *J. Agric. Mach.*, vol. 14, no. 1, pp. 35–47, 2024, doi: 10.22067/jam.2023.83626.1182.
- [28] C. E. Aralu, D. E. Karakitie, and D. A. Fadare, "Construction of a pilot scale biogas digester at the University of Ibadan Dairy Farm, Abadina," *Fuel Commun.*, vol. 9, p. 100033, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jfueco.2021.100033.
- [29] D. E. Ganas, "Influence of Digester Height-to-Diameter Ratio on Biomethanation of Market Vegetable Wastes," *Mindanao J. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 142–156, Dec. 2022, doi: 10.61310/mndjstict.0983.22.
- [30] Z. Teng, J. Hua, C. Wang, and X. Lu, "Design and optimization principles of biogas reactors in large scale applications," in *Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology*, F. B. T.-R. and P. D. in S. E. T. Shi, Ed., Amsterdam: Elsevier, 2014, pp. 99–134. doi: 10.1016/B978-0-444-59566-9.00004-1.
- [31] T. A. S. Biosantech, D. Rutz, R. Janssen, and B. Drosch, "Biomass resources for biogas production," in *The Biogas Handbook*, Elsevier, 2013, pp. 19–51. doi: 10.1533/9780857097415.1.19.
- [32] M. Banzi, *Getting Started with Arduino*, 2nd ed. Books, an imprint of Maker Media, 2011. [Online]. Available: https://www.sarcnet.org/files/Getting_Started_With_Arduino.pdf
- [33] Bernal-Calderon Jessica Paola and J. Pa. Orozco-Aguirre, "Comparación del estiércol bufalino y bovino como potenciales inóculos en el proceso de digestión anaerobia," Universidad Popntificia Bolivariana, 2019.
- [34] R. Rajagopal, D. I. Massé, and G. Singh, "A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia," *Bioresour. Technol.*, vol. 143, pp. 632–641, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.06.030.
- [35] D. B. Cobián, "Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost," Universidad de León, 2009. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10612/1066>
- [36] A. Ajayi-Banji and S. Rahman, "A review of process parameters influence in solid-state anaerobic digestion: Focus on performance stability thresholds," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 167, p. 112756, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112756.
- [37] FAO, "Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores," Buenos Aires, Argentina, 2019.





- [38] B. A. Parra Orobio *et al.*, “Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal Effect of Substrate-Inoculum Ratio on the Biochemical Methane Potential of Municipal Biowastes,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 1, no. 4, pp. 515–526, 2015.
- [39] R. Castro-Rivera, M. M. Solís-Oba, V. Chicatto Gasperin, and A. Solís-Oba, “Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.),” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 36, no. 3, pp. 529–539, Aug. 2020, doi: 10.20937/RICA.53545.
- [40] T. Benabdallah El Hadj, S. Astals, A. Galí, S. Mace, and J. Mata-Álvarez, “Ammonia influence in anaerobic digestion of OFMSW,” *Water Sci. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 1153–1158, Mar. 2009, doi: 10.2166/wst.2009.100.
- [41] J. J. Castro-Ramos, A. Solís-Oba, M. Solís-Oba, C. L. Calderón-Vázquez, J. M. Higuera-Rubio, and R. Castro-Rivera, “Effect of the initial pH on the anaerobic digestion process of dairy cattle manure,” *AMB Express*, vol. 12, no. 1, p. 162, Dec. 2022, doi: 10.1186/s13568-022-01486-8.
- [42] S. Guštin and R. Marinšek-Logar, “Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 89, no. 1, pp. 61–66, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.psep.2010.11.001.
- [43] Bres Patricia, “Optimización de la digestión anaeróbica del guano de aves ponedoras,” Universidad Nacional de San Martín, 2019. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/335289805.pdf>
- [44] R. Parra Huertas, “Anaerobic digestion: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry,” *Prod. + Limpia*, vol. 10, no. 2, pp. 142–159, 2015.
- [45] A. Mustapha Ali, Y. Mohammed Chindo, and S. Audu Yaro, “Improvement on the design of a small scale anaerobic floating drum biogas digester,” *Int. J. Eng. Technol. Res.*, vol. 17, no. 5, pp. 228–237, 2019.
- [46] C. Mao, Y. Feng, X. Wang, and G. Ren, “Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 540–555, May 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.032.
- [47] C. Manyi-Loh, S. Mamphweli, E. Meyer, A. Okoh, G. Makaka, and M. Simon, “Microbial Anaerobic Digestion (Bio-Digesters) as an Approach to the Decontamination of Animal Wastes in Pollution Control and the Generation of Renewable Energy,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 10, no. 9, pp. 4390–4417, Sep. 2013, doi: 10.3390/ijerph10094390.
- [48] J. Yang *et al.*, “Ammonia inhibition in anaerobic digestion of organic waste: a review,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 5, pp. 3927–3942, Mar. 2025, doi: 10.1007/s13762-024-06029-1.
- [49] A. F. Aili Hamzah, M. H. Hamzah, H. Che Man, N. S. Jamali, S. I. Siajam, and M. H. Ismail, “Effect of organic loading on anaerobic digestion of cow dung: Methane production and kinetic study,” *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e16791, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16791.
- [50] L. C. Corrales, D. M. Antolinez Romero, J. A. Bohórquez Macías, and A. M. Corredor Vargas, “Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta,” *Nova*, vol. 13, no. 24, pp. 55–81, Dec. 2015, doi: 10.22490/24629448.1717.
- [51] J. R. L. Canepa and J. A. S. Olivier, “Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un biodigestor tipo cúpula,” *Ingeniería*, vol. 17, no. 1, pp. 57–65, 2013.





Reducción sucesiva de superestructura para la síntesis de redes de transmisión de gas natural

EDUARDO FLORES-VELÁZQUEZ, JUAN M. ZAMORA-MATA

Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco, Núm. 186, Alcaldía de Iztapalapa, CDMX, 09320, México

Autor de Correspondencia: Juan Manuel Zamora-Mata (e-mail: jmzm@xanum.uam.mx).

Este trabajo fue desarrollado en el Laboratorio de Síntesis, Optimización y Simulación de Procesos de la Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa.

RESUMEN Debido a ventajas tecnológicas y medioambientales, se ha extendido el uso de gas natural en centros de consumo, así como en proyectos industriales. El gas natural se transporta a través de redes de transmisión, constituidas por estaciones de compresión interconectadas por segmentos de ducto. El costo total anual (CTA) de una red involucra costos de inversión, y costos asociados al consumo de gas para operar las estaciones de compresión. Este trabajo presenta una metodología de varias etapas para la síntesis de redes de transmisión de gas natural. A partir de una superestructura de red, la metodología utiliza un modelo de programación no lineal que minimiza el CTA de la red y reduce la topología de la superestructura, eliminando estaciones de compresión redundantes. En las siguientes etapas de la metodología, se repite el procedimiento a partir de las superestructuras reducidas que se van generando. El procedimiento termina cuando la optimización mantiene todas las estaciones de compresión de la superestructura reducida correspondiente. La efectividad de la metodología se muestra con la síntesis de una red de gas de un caso ilustrativo, para el que se obtiene un diseño de menor CTA que el reportado en la literatura.

PALABRAS CLAVE: Síntesis de redes de gas natural, Diseño Óptimo, Optimización, Superestructura, Programación no lineal.

1. INTRODUCCIÓN

Con el propósito de alcanzar un desarrollo sostenible es necesario reducir las emisiones de CO₂, por ello es preciso emplear fuentes energéticas de bajas o cero emisiones; así el empleo de gas natural en la industria y generación eléctrica

se ha visto extendido. Particularmente, en el caso de México, el gas natural corresponde al 21% de la estructura de producción de energía primaria [1]. En este contexto, existe la necesidad de llevar el gas natural desde puntos que funcionan como fuentes de gas natural hacia los centros que lo requieren y funcionan como centros de consumo a través de una red de transmisión de gas natural. Una red de transmisión de gas natural, se compone de estaciones de compresión interconectadas a través de segmentos de ducto que transportan a la mezcla de gas natural [2]. Debido a la complejidad en el modelado y la integración entre los elementos que componen a la red, la tarea de síntesis de redes de transmisión de gas natural que se debe enfrentar se dificulta. Dependiendo del caso, el problema de síntesis puede abordarse con distintas metas de optimización: maximización del rendimiento de las redes de gasoductos, minimización del consumo de combustible en los compresores, ubicación de las estaciones de compresión, maximización de los beneficios, minimización del costo total de los segmentos de ducto, encontrar el número óptimo de estaciones de compresión, minimizar el coste del consumo de combustible y maximizar el volumen de almacenamiento en los ductos [3]. En este trabajo, el objetivo consiste en minimizar el CTA de la red de transmisión, con un consumo óptimo de combustible en las estaciones de compresión, por ello se presenta una metodología que emplea reducción sucesiva de una superestructura propuesta. La metodología tiene un enfoque basado en programación matemática, específicamente, a partir de la superestructura se formula un modelo de programación no lineal (PNL) asociado, y posteriormente, si se requiere, se genera una superestructura reducida y su modelo de PNL asociado. Finalmente, el uso de la metodología presentada se ilustra con el diseño de la



red de transmisión de gas natural de un caso de estudio presentado en la literatura, y se muestra su efectividad al determinar una solución de menor costo que las reportadas previamente para el caso de estudio.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describen brevemente las etapas que componen a la metodología de reducción sucesiva empleada para abordar el problema de síntesis de redes óptimas de transmisión de gas natural.

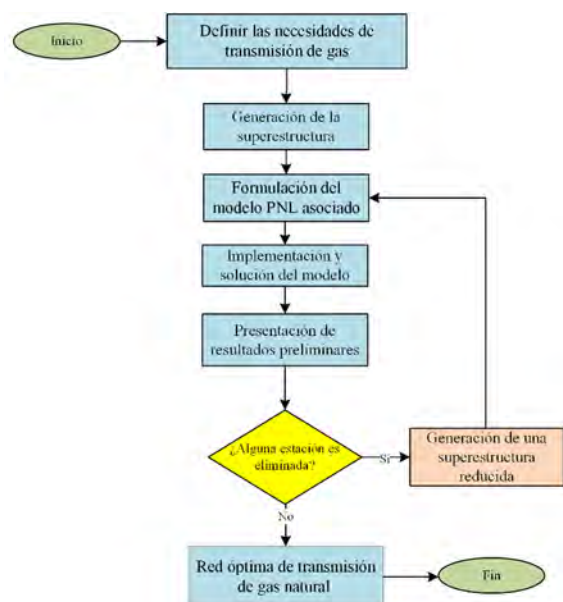


FIGURA 1. Metodología de reducción sucesiva para la síntesis de redes óptimas de gas natural, realizado con información de Flores-Velázquez [4].

En la Fig. 1 se muestra la metodología como diagrama de flujo de información para la síntesis de una red óptima de transmisión de gas natural.

2.1. Definición de necesidades de transmisión de gas natural

En esta etapa se recaba información para definir las necesidades de transmisión de gas natural; entre otros, se especifican: a) el flujo volumétrico de gas que se ha de transmitir (millones de pies cúbicos por día, MMcfd), b) la presión disponible en la fuente de gas (psia) y la presión requerida en los centros de consumo (psia), c) la distancia entre la fuente de gas natural y cada centro de consumo (millas, mi), d) así como los datos económicos asociados, datos de la mezcla de gas natural y estaciones de compresión.

2.2. Generación de una superestructura

Derivado de la definición de las necesidades de transmisión de gas natural, se propone una superestructura. Esta superestructura se compone inicialmente por un número redundante de estaciones de compresión interconectadas por segmentos de ducto necesarios para llevar gas desde las fuentes hasta los centros de consumo.

2.3. Formulación del modelo de PNL asociado

En esta etapa se formula el modelo de programación no lineal asociado a la superestructura propuesta. En este modelo, la función objetivo minimiza el CTA de la red que se compone de los costos de capital, los costos por operación y mantenimiento de las estaciones de compresión (CE), los costos de capital de los segmentos de ducto que interconectan a las estaciones (CSD) [2]. Se definen así mismo, las variables de decisión involucradas: potencias de compresión W (hp), relaciones de compresión R_c (-), presión de succión P_s (psia) y presión de descarga P_d (psia) en las estaciones, longitud en los segmentos de ducto (mi), diámetro de los segmentos de ducto (in), flujo volumétrico transportado (MMcfd); por otro lado, las restricciones del modelo que se componen de: i) balances de flujo volumétrico en las estaciones de compresión y divisores de flujo de la superestructura ii) ecuaciones que modelan la potencia de cada estación de compresión [5], iii) ecuaciones que modelan la relación de compresión y la relación entre presiones en cada estación de compresión, iv) balances de energía en cada segmento de ducto para calcular las caídas de presión del gas natural [6], v) ecuaciones que modelan la distancia entre la fuente de gas y los centros de consumo y vi) las cotas para toda variable de decisión involucrada en el modelo de optimización.

2.4. Solución del modelo y análisis de resultados

En esta etapa, el modelo asociado se implementa y soluciona en un lenguaje computacional apropiado. De los resultados obtenidos, se realiza un análisis de resultados en las estaciones de compresión: si no existen estaciones cuya potencia sea $W = 0$ hp o relación de compresión $R_c = 1$, se concluye que se ha sintetizado una red óptima de transmisión de gas natural; en el caso de existir estaciones cuyo resultado sea $W = 0$ hp o $R_c = 1$, estas estaciones son eliminadas durante esta etapa, debido a que en las restricciones del modelo se considera un porcentaje fijo del flujo de gas natural como combustible por estación. Esto es, las estaciones aún siendo eliminadas, presentan costo de combustible en la solución óptima debido a las limitaciones de la PNL.

2.5. Reducción sucesiva de la superestructura

En esta etapa se realiza la generación de una superestructura reducida, que no considera las estaciones de compresión previamente eliminadas. Asociada a la superestructura reducida se formula un nuevo modelo de programación no lineal asociado. Esto con el fin de refinar el resultado y obtener un CTA más preciso. Esta etapa de reducción sucesiva del diseño se repite hasta que la optimización deja de eliminar estaciones de compresión.

3. RESULTADOS

La metodología de reducción sucesiva de superestructura para la síntesis de redes de transmisión de gas natural anteriormente descrita se aplica en un caso de estudio presentado Edgar y Himmelblau [2].

3.1. Enunciado del caso de estudio

El caso de estudio presentado en este trabajo parte de un ejemplo propuesto por Edgar y Himmelblau [2]. El caso de estudio se enuncia a continuación: se requiere suministrar gas natural a dos centros de consumo (A y B) a una presión definida, el gas natural se transmite desde una fuente de gas natural con presión inicial y flujo volumétrico dado. Se tienen las siguientes suposiciones: los centros de consumo A y B reciben el mismo flujo volumétrico, se realiza trabajo adiabático en las estaciones de compresión, el sistema de transmisión permanece horizontal en su trayecto. Para resolver este caso de estudio, se emplean los datos y valores de las cotas para las variables del modelo, que se incluyen en las Tablas 1 a 4.

TABLA 1. Datos económicos usados en el caso de estudio [2].

Símbolo	Descripción	Valor
C_s	Costo de capital anualizado para ductos	870 \$/(in·mi·año)
C_c	Costo de capital anualizado para estaciones de compresión	70 \$(hp·año)
C_o	Costo anual para operación y mantenimiento de las estaciones de compresión	8 \$(hp·año)

TABLA 2. Datos del gas natural y estaciones de compresión usados en el caso de estudio [2].

Símbolo	Descripción	Valor
Z	Factor de compresibilidad	0.88
k	Relación de capacidades caloríficas	1.26
T_{in}	Temperatura de succión en la estación	520 °R
PCC	Porcentaje de consumo de combustible en la estación	0.5 %

TABLA 3. Especificaciones de la red en el caso de estudio [2].

Símbolo	Descripción	Valor
L_A	Distancia entre la fuente y A	175 mi
L_B	Distancia entre la fuente y B	200 mi
Q_{in}	Flujo de gas en la entrada del sistema	600 MMcfd
P_{in}	Presión de gas en la entrada del sistema	500 psia
P_A	Presión requerida en A	600 psia
P_B	Presión requerida en B	300 psia

TABLA 4. Valor de las cotas para cada variable en el caso de estudio [2].

Descripción	Cota inferior	Cota superior
Relación de compresión	$R_{c_{min}} = 1$	$R_{c_{max}} = 2$
Presión de succión	$P_{s_{min}} = 200$ psia	$P_{s_{max}} = 1000$ psia
Presión de descarga	$P_{d_{min}} = 200$ psia	$P_{d_{max}} = 1000$ psia
Longitud de segmento	$L_{min} = 2$ mi	$L_{max} = 200$ mi
Diámetro de segmento de ducto	$D_{min} = 4$ in	$D_{max1} = 36$ in, $D_{max2,3} = 18$ in
Flujo volumétrico	$Q_{min} = 200$ MMcfd	$Q_{max} = 600$ MMcfd

3.2. Superestructura propuesta

Como propuesta inicial, se presenta la superestructura mostrada en la Fig. 2. Inicialmente se compone de 10 estaciones de compresión interconectadas por 11 segmentos de ducto que se distribuyen de la siguiente manera: Ramal 1, se compone de 4 estaciones de compresión y 3 segmentos de ducto, Ramal 2, se compone de 3 estaciones de compresión y 4 segmentos de ducto, Ramal 3, se compone de 3 estaciones de compresión y 4 segmentos de ducto.

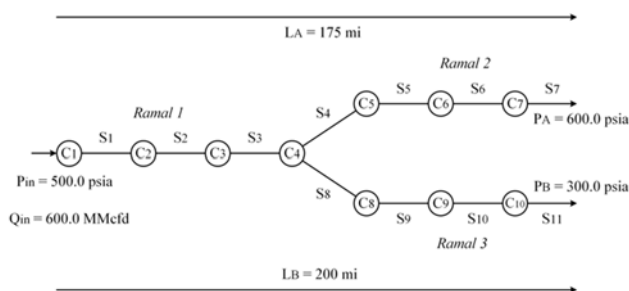


FIGURA 2. Superestructura propuesta [2].

3.3. Modelo de programación no lineal asociado, NLP1

Dado el conjunto de estaciones de compresión $i \in I = \{1, 2, \dots, 10\}$ y el conjunto de segmentos de ducto $j \in J = \{1, 2, \dots, 11\}$, se tienen las siguientes variables en el modelo: i) D_j , diámetro de segmento de ducto (in), ii) L_j , longitud de segmento de ducto (mi), iii) Q_j , flujo volumétrico de gas natural (MMcfd), iv) P_{si} , presión de succión de la estación de compresión (psia), v) P_{di} , presión de descarga de la estación de compresión (psia), vi) R_{ci} , relación de

compresión de la estación de compresión (-), vii) W_i , potencia requerida en la estación de compresión (hp).

Función objetivo:

$$\text{Minimizar } CTA = (C_C + C_O) \sum_{i=1}^{10} W_i + C_S \sum_{j=1}^{11} (D_j L_j) \\ f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (1)$$

Sujeta a la siguiente serie de restricciones:

$$Q_j = Q_{j-1} \oplus (1 - PCC), f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (2)$$

$$Q_4 + Q_8 = Q_3 \oplus (1 - PCC), f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (3)$$

$$Q_3 \cdot (1 - PCC) = 2 \cdot Q_4, f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (4)$$

$$Q_3 \cdot (1 - PCC) = 2 \cdot Q_8, f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (5)$$

$$Q_j^2 \cdot L_j = (871 \times 10^{-6})^2 \cdot D_j^{16/3} \cdot (Pd^2 - Ps^2), f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^3 L_j + \sum_{j=4}^7 L_j = L_A, f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^3 L_j + \sum_{j=8}^{11} L_j = L_B, f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (8)$$

$$W_i = 0.08531 \cdot Q_i \cdot \left(\frac{k}{k-1} \right) T_{in} \cdot \left(Rc_i^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (9)$$

$$Rc_i = Pd_i / Ps_i, f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (10)$$

$$Pd_i \geq Ps_i, f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (11)$$

3.4. Solución del modelo y análisis de resultados preliminares

Para este trabajo, la solución se obtiene en el ambiente de Wolfram-Mathematica [7]. En la Tabla 5 se presentan los valores óptimos obtenidos para las estaciones de compresión; de la Tabla 5 se puede ver que las estaciones de compresión C_4 , C_5 , C_6 , C_7 , C_9 y C_{10} son eliminadas, ya que presentan una potencia de compresión $W_i = 0$ y $Rc_i = 1$. El diseño preliminar obtenido se presenta en la Fig. 3, con un $CTA = 7,083,730$ (\$/año) y en conjunto, las estaciones de compresión consumen 20.688 MMcf/d.

De la optimización de la superestructura (Fig. 2) se obtienen valores para cada una de las variables involucradas que se presentan en las Tablas 6 y 7. En la Tabla 6 se muestran las características de diseño de cada segmento de ducto y en la Tabla 7 la presión a la que el flujo volumétrico de gas natural entra al segmento (Pd) de ducto y la presión a la que el flujo volumétrico sale del segmento de ducto (Ps). Mostrando así la caída de presión a lo largo del segmento de ducto. Sin embargo, aún se considera el combustible usado en las estaciones eliminadas, por lo que es necesario proceder a la etapa de generación de una superestructura reducida (Fig. 1).

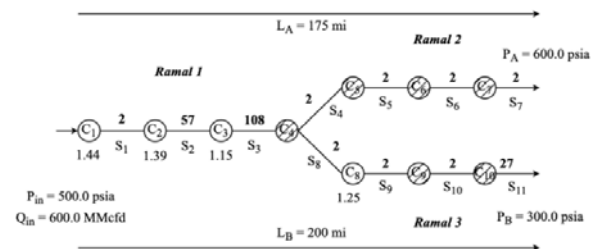


FIGURA 3. Resultado del proceso de optimización de la superestructura.

TABLA 5. Resultado de la optimización de la superestructura en las estaciones de compresión.

	Estación de compresión i	Ps (psia)	Pd (psia)	Rc (-)	W (hp)	Comb (MMcf/d)
Ramal 1	1	500	722.2	1.44	8860.5	3
	2	718.0	1000	1.39	7918.6	2.98
	3	869.3	1000	1.15	3273	2.97
	4	735.8	735.8	1	0	2.96
Ramal 2	5	703.8	703.8	1	0	1.47
	6	670.7	670.7	1	0	1.46
	7	636.1	636.1	1	0	1.46
	8	703.8	885.2	1.26	2674.9	1.47
Ramal 3	9	859.1	859.1	1	0	1.46
	10	832.5	832.5	1	0	1.46

TABLA 6. Características de diseño de los segmentos de ducto de la optimización de la superestructura.

	Segmento de ducto j	Flujo (MMcf/d)	Diámetro (in)	Longitud (mi)
Ramal 1	1	597	34.38	2
	2	594.015	32.11	56.97
	3	591.045	32.11	108.03
Ramal 2	4	294.045	18	2
	5	292.575	18	2
	6	291.112	18	2
	7	289.656	18	2
Ramal 3	8	294.045	18	2
	9	292.575	18	2
	10	291.112	18	2
	11	289.656	18	27

TABLA 7. Presión de entrada (Pd) y salida (Ps) en los segmentos de ducto.

	Segmento de ducto j	Pd (psia)	Ps (psia)
Ramal 1	1	722.1	718.0
	2	1000	869.3
	3	1000	735.8
Ramal 2	4	735.8	703.8
	5	703.8	670.6
	6	670.6	636.1
	7	636.1	600 ¹
Ramal 3	8	735.8	703.8
	9	885.2	859.1
	10	859.1	832.4
	11	832.4	300 ²

3.5. Reducción de la superestructura

Posterior al análisis de resultados de optimizar la superestructura (Fig. 3), se genera la superestructura reducida mostrada en la Fig. 4, que considera las estaciones de compresión que resultaron previamente con potencia de compresión $W_i \neq 0$, interconectadas a través de segmentos de ducto.

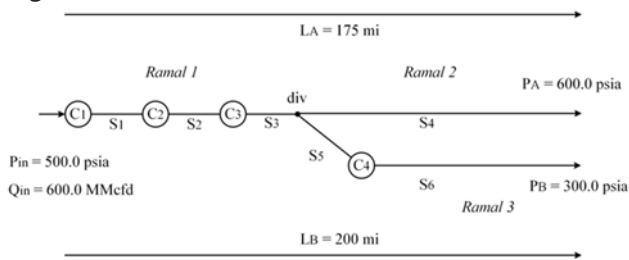


FIGURA 4. Superestructura reducida.

En resumen la superestructura reducida (Fig. 4) se integra de tres ramales: Ramal 1, compuesto por 3 estaciones de compresión y 3 segmentos de ducto que conectan la fuente de gas con el nodo de bifurcación (div) al finalizar el ramal; Ramal 2, se compone de un segmento de ducto que conecta el nodo div con el centro de consumo A; por otro lado el Ramal 3, se compone de 2 segmentos de ducto, que interconectan el nodo div, una estación de compresión y el centro de consumo B.

3.6. Modelo de programación no lineal asociado, NLP 2

Para la superestructura reducida (Fig. 4) se tiene el conjunto de estaciones de compresión $i \in I = \{1,2,3,4\}$ y el conjunto de segmentos de ducto $j \in J = \{1,2,...,6\}$, con las siguientes variables en el modelo: i) D_j , diámetro del segmento de ducto (in), ii) L_j , longitud del segmento de ducto (mi), iii) Q_j , flujo volumétrico de gas natural (MMcf/d), iv) Ps_i , presión de succión de la estación de compresión (psia),

v) Pd_i , presión de descarga de la estación de compresión (psia), vi) Rc_i , relación de compresión de la estación de compresión (-), vii) W_i , potencia requerida en la estación de compresión (hp). El problema de PNL asociado está dado por el modelo NLP2:

Función objetivo:

$$\text{Minimizar } CTA = (C_c + C_o) \sum_{i=1}^4 W_i + C_s \sum_{j=1}^6 (D_j L_j)$$

$$f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} + e^{-g x}}$$

(1)

2)

Sujeta a la siguiente serie de restricciones:

$$Q_j = Q_{j-1} \Phi(1 - PCC), f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} + e^{-g x}}$$

(1)

3)

$$Q_4 + Q_5 = Q_3, f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} + e^{-g x}}$$

(1)

4)

$$Q_3 = 2 \cdot Q_4, f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} + e^{-g x}}$$

(1)

5)

$$Q_3 = 2 \cdot Q_5, f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} + e^{-g x}}$$

(1)

6)

$$Q_j^2 \cdot L_j = (871 \times 10^{-6})^2 \cdot D_j^{16/3} \cdot (Pd^2 - Ps^2), f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} + e^{-g x}}$$

(1)

7)

$$\sum_{j=1}^3 L_j + L_4 = L_A, f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} + e^{-g x}}$$

(1)

8)

$$\sum_{j=1}^3 L_j + L_5 + L_6 = L_B, f(x) = \frac{e^{g x_-} - e^{-g x}}{e^{g x_+} + e^{-g x}}$$

(1)

9)

$$W_i = 0.08531 \cdot Q_i \cdot \left(\frac{k}{k-1} \right) T_{in} \cdot \left(R C_i^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (2)$$

$$R C_i = P_{d_i} / P_{s_i} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (21)$$

$$P_{d_i} \geq P_{s_i} f(x) = \frac{e^{g x} - e^{-g x}}{e^{g x} + e^{-g x}} \quad (22)$$

Nótese que en las ecuaciones 14, 15 y 16, se modela el flujo volumétrico de gas natural en el nodo de bifurcación div.

3.7. Síntesis de una red óptima de transmisión de gas natural

Al optimizar la superestructura reducida mostrada en la Fig. 4, se obtiene la red óptima de transmisión de gas natural mostrada en la Fig. 5, en la que efectivamente, las 4 estaciones de compresión contempladas permanecen en la estructura óptima.

En las Tablas 8 a 10 se presentan los valores que especifican el diseño óptimo de la red de transmisión de gas natural sintetizada (Fig. 5). La tabla 8 se presenta los valores a los que deben operar las estaciones de compresión. En la Tabla 9, se describen las dimensiones que debe tener cada segmento de ducto, así como el flujo de gas natural que se transporta. Por otro lado, la Tabla 10, presenta la presión de entrada (Pd) del flujo de gas y la presión a la que sale del segmento de ducto (Ps). La red de transmisión de gas obtenida presenta un CTA = 7,006,660 (\$/año), lo que significa un ahorro de 77,070 (\$/año) y un consumo de combustible conjunto en las estaciones de compresión de 10.432 MMcfd. La Tabla 11, presenta los diferentes costos de las estaciones de compresión (CE), los costos por los segmentos de ducto (CSD), el costo total anual (CTA), así como el combustible consumido (Comb); al optimizar la superestructura propuesta inicialmente (Fig. 2) y en una etapa posterior la optimización de la superestructura reducida (Fig.4).

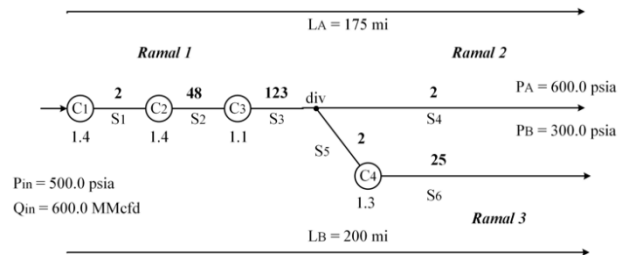


FIGURA 5. Red óptima de transmisión de gas natural.

TABLA 8. Resultado en las estaciones de compresión

	Estación de compresión n	Ps (psia)	Pd (psia)	Rc (-)	W (hp)	Comb (MMcfd)
Ramal 1	1	500	722.2	1.44	8860.5	3
	2	718.0	1000	1.39	7918.6	2.98
	3	886.4	1000	1.12	2812.5	2.96
Ramal 3	4	642.8	815.7	1.23	2794.2	1.48

TABLA 9. Características de diseño de los segmentos de ducto de la optimización de la superestructura reducida

	Segmento de ducto j	Flujo (MMcfd)	Diámetro (in)	Longitud (mi)
Ramal 1	1	597.0	34.38	2
	2	594.0	31.89	48.2
	3	591.0	31.89	122.8
Ramal 2	4	295.5	15.60	2
Ramal 3	5	295.5	18	2
	6	294.0	18	25

TABLA 10. Presión de entrada (Pd) y salida (Ps) en los segmentos de ducto

	Segmento de ducto j	Pd (psia)	Ps (psia)
Ramal 1	1	722.161	717.982
	2	1000	886.42
	3	1000	678.01
Ramal 2	4	678.01	600
Ramal 3	5	678.01	642.809
	6	815.7	300

TABLA 11. Tabla comparativa de resultados

	CE (\$/año)	CSD (\$/año)	CTA (\$/año)	Comb (MMcfd)
Optimización de la Superestructura	1,772,716	5,311,012	7,083,730	20.688
Optimización de la Superestructura reducida	1,746,098	5,254,561	7,000,660	10.432





3.8. Comparación con diseños previos

En la Tabla 12 se presenta una comparación de los resultados obtenidos con la metodología descrita en este trabajo frente a resultados previos de la literatura. Como se puede ver en la Tabla 12, el CTA del diseño mostrado en la Fig. 5 está por debajo de los costos de los diseños reportados previamente por Edgar y Himmelblau [2] y Godínez [8]. Por otro lado, en los diseños presentados por Edgar y Himmelblau [2] y Godínez [8] el consumo de combustible es significativamente mayor.

TABLA 12. Comparación con resultados previos

Diseño reportado	CTA	Consumo de combustible (MMcfd)
Edgar y Himmelblau [2]	7,083,730	20.6
Godínez-Valenzo [8]	7,395,879	20.6
Este trabajo (Fig. 4)	7,000,660	10.432

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una metodología que propone la reducción sucesiva de una superestructura para la síntesis de redes de transmisión de gas natural. La metodología utiliza modelos de programación no lineal que minimizan el CTA de la superestructura original y las superestructuras reducidas; eliminando gradualmente las estaciones de compresión redundantes hasta llegar al mejor diseño de red. El uso del enfoque desarrollado se ilustró con el diseño de una red de transmisión de gas natural de un caso de estudio. El diseño de red obtenido presenta un menor CTA que el costo reportado en los diseños de la literatura, los cuales fueron desarrollados utilizando técnicas de optimización basadas en una sola etapa. Finalmente, los resultados obtenidos permiten afirmar que la metodología desarrollada puede ser muy útil en la fase inicial de síntesis de redes de transmisión de gas natural.

REFERENCIAS

- [1]. SENER. *Balance Nacional de Energía*. Secretaría de Energía (2023).
- [2]. Edgar TF and Himmelblau DM. *Optimization of Chemical Processes*. McGraw-Hill, 2 Edition (2001).
- [3]. Arya AK, Jain R, Yadav S, Bisht S, and Gautam S, *Recent trends in gas pipeline optimization*. Materials Today Proceedings 57, 1455–1461 (2021). 10.1016/j.matpr.2021.11.232.
- [4]. Flores-Velázquez E. *Diseño Óptimo de una Red de Transmisión de Gas Natural*. Seminario de Proyectos I y II de la Licenciatura en Ingeniería en Energía.

Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa (2025).

- [5]. Katz DL. *Handbook of Natural Gas Engineering*. McGraw-Hill (1959).
- [6]. GPSA. *Engineering Data Book*. Gas Processors Suppliers Association (1972).
- [7]. Wolfram Research. *FindMinimum*. Wolfram Language function. (1988).
- [8]. Godínez-Valenzo R. *Diseño Óptimo de una Red de Distribución de Gas Natural*. Seminario de Proyectos I y II de la Licenciatura en Ingeniería en Energía. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa (2015).





Creencias consumistas vs. creencias sustentables

OSCAR R. CALOCA OSORIO¹, CRISTIAN E. LERICHE GUZMÁN¹ Y VÍCTOR M. SOSA GODÍNEZ¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Economía, Avenida San Pablo 180, CDMX, 02128, México

Autor de Correspondencia: Víctor M. Sosa Godínez (e-mail: vmsg@azc.uam.mx)

RESUMEN Los procesos de irreversibilidad entrópica conllevan un agotamiento de los recursos, donde no existe un cambio del sistema de producción capitalista. Lo importante es el remedio que le demos a esta circunstancia: explotación lenta de los recursos (la energía) enfrentando los embates del calentamiento global vía una reducción en el uso de las energías para producir los bienes de consumo social.

Claro que los objetivos de la investigación son que no basta hacer más con menos, o sea, ser más productivo con un menor uso de energía, sino que también se requiere un cambio cultural de gran envergadura, que conduzca a la ideología occidental a la adopción de un pensamiento donde el tener material no sea el ideal de realización. Lo que implica es una transformación de un pensamiento meramente racional fuerte [teoría de la elección racional], por una razonabilidad. Donde las creencias consumistas sean transformadas por creencias sustentables. Para revertir, vía un menor uso de la energía, el calentamiento global.

La transformación del pensamiento de racional a razonable conlleva el cambio de un pensamiento teleológico de la maximización de la ganancia capitalista, a la obtención de lo mejor posible para el medio ambiente. Solo es necesario tener cuidado con el principio de sustentabilidad. Pues, esta idea es ambigua, puesto que puede indicarnos: 1) que la generación actual de gente pobre debe soportar una situación espartana, o 2) si la sustentabilidad significa que las generaciones del futuro deben tener el mismo nivel de vida que la generación actual, entonces tan sólo implica que la pobreza se va a perpetuar.

PALABRAS CLAVE: Calentamiento global, creencias consumistas, creencias sustentables, sustentabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Las circunstancias que implican los procesos de irreversibilidad entrópica conllevan necesariamente a un agotamiento de los recursos. Sin embargo, nos enfrentamos a una paradoja ambiental: esos recursos también pueden agotarse. Es por ello, que se necesita, en el corto y mediano plazo, generar un proceso de aprendizaje sobre la manera en que se agotan los recursos naturales con la finalidad que tal *situación* ocurra de una manera lenta [Meadows y *et al*, 1972]. Ello, porque no existen directrices de cambio a un sistema de producción diferente del capitalista.

Lo importante es el remedio que le demos a este tipo de circunstancia: explotación lenta de los recursos enfrentando los embates del calentamiento global y el malgaste de la energía [para el caso véase Panayotou, 1994]. Es por ello, que se hacen necesarias acciones que contemplen las circunstancias cambiantes en el clima debidas al calentamiento global. Así, el objetivo es: enunciar la transformación de creencias consumistas en creencias sustentables resolviendo la deficiente utilización de la energía.

Los recursos no renovables indudablemente se van a agotar. Sin embargo, a nosotros nos toca decidir si esto sucederá en el corto, mediano o largo plazo (Panayotou, 1994). Esto implica que las alternativas se vuelcan hacia la explotación de recursos en otros mundos: convertir los mundos en habitables para su explotación o terraformarlos, para después ¿desecharlos?

Por supuesto que no basta hacer más con menos, sino que también se requiere un cambio cultural de gran envergadura, que conduzca a la ideología occidental a la adopción de un pensamiento donde el tener cada vez más no sea el ideal de realización personal. La sobredotación de bienes no es garante de una plena felicidad, ni de una realización de los individuos en un futuro donde “casi” todo escasee.





Para ello, los seres humanos, como entes pensantes y con potencial consciencia, tienen que construir su identidad no a partir del egoísmo del ser individual sino de la solidaridad del todos en uno y del uno en todos. Esto implica una transformación de la teoría de la elección racional, por una racionalidad débil o razonabilidad.

Lo cierto es que se requiere de una transformación paradigmática del ser en la sociedad occidental ahora y para siempre. Esta transformación urge, puesto que el proceso de degradación ambiental nos conduce a un hecho en el que la amplia opinión científica determina que la acumulación de gases de invernadero generará algún día en el próximo siglo [siglo XXI] un incremento en la temperatura en la superficie de 1.5 °C a casi 4.5 °C. La tasa de calentamiento se calcula en casi un 0.3 °C por decenio, 0.25 más que en el pasado.

2. EL PRINCIPIO DE SUSTENTABILIDAD Y LA ENTROPÍA

El principio de sustentabilidad medio ambiental implica que el uso de los recursos por las generaciones presentes no comprometa el mismo por parte de las generaciones futuras. Sin embargo, esta idea vista desde lo general es sumamente ambigua, puesto que puede indicarnos dos situaciones: 1) que la generación actual de gente pobre debe soportar una situación espartana, con el fin de que la generación siguiente pueda tener un nivel de vida mejor, entonces implica el sostenimiento de una situación de injusticia social, o 2) si la sustentabilidad significa que las generaciones del futuro deben tener el mismo nivel de vida que la generación actual, entonces tan sólo implica que la pobreza se va a perpetuar. (Panayotou 1994: 185).

Para conseguir una situación en donde se logre la minimización de la pobreza y la mejor posible eficiencia ambiental, se requieren dos transformaciones radicales: 1) un avance tecnológico lo suficientemente sólido y eficaz para mejorar el aprovechamiento de los recursos, sobre todo de las fuentes de energía renovable y no renovable y 2) una transformación de la ideología occidental: un cambio en los valores.

En este sentido, nuestra concepción de economía sustentable implica una transformación de las creencias cognitivas occidentales acerca del consumo que lleven a unas creencias cognitivas-sustentables, más acordes con un consumo moderado y alejado de lo desechable.

Lo que puede realizarse por medio de un cambio de creencias cognitivas falsas por creencias cognitivas razonables no falsas, puesto que el conocimiento limitado de uno mismo, está constituido por conjuntos de creencias cognitivas falsas y no falsas: salvo que las primeras son erróneas y las otras pueden o no conducir al error.

2.1. Memética

En este caso la memética concibe su estructura a través de unas partes mínimas, pero sumamente significativas del quehacer cultural humano: los memes; éstos son unidades básicas de información cultural, es decir, que toda cultura humana está compuesta sistémicamente por memes, los cuales pueden variar de un espacio-tiempo a otro. En este sentido, nos presentamos ante l@s demás y ell@s ante nosotros como unidades meméticas personales, donde se almacena información emocional, axiológica, y empática específica, que bien puede existir o no dependiendo de cada persona y estructura mental [una lesión cerebral bien pudiese limitar este proceso].

De tal suerte que es posible conformar un espectro ordinal de importancia de la información individual, colectiva y social, pasando de grupos pequeños a sociedades que habitan una nación o la información de uso común en el mundo: la cultura humana. Ahora, los memes individuales pueden ser parte de un subconjunto de los memes colectivos. La diferencia entre la elección de memes individuales y colectivos es el orden de acumulación de conocimiento que comparte con otras personas, siendo el conjunto de conocimiento común social el acervo cultural. Y donde, la cultura humana se puede representar por la interacción en un tiempo determinado (t_i) y en un espacio en específico (esp_j) [en este caso sublunar o no: que contempla a las personas y tecnología que se ubica en la tierra y fuera de ella: rovers, sondas, etc.]. Así, el dilema ambiental de calentamiento global vía un uso deficiente de energía es un problema de la cultura humana.

3. CREENCIAS Y ELECCIÓN DE ACCIONES INDIVIDUALES A COLECTIVAS

Es necesario observar los mecanismos de elección de la persona bajo creencias cognitivas, ante múltiples opciones de acción.

Así con base en Mosterín (1978: 23), aunado a considerar la existencia de conocimiento limitado, dado por los memes individuales, colectivos y sociales que posee el persona, creer razonablemente y tendencialmente aproximarse al error respecto de sus opciones de acción de la persona, dado por una identidad buena implica que:

Dada la opción de acción a_i para toda persona: se cree razonablemente y no falso si y solo si

- i) la persona tiene una creencia sobre una opción de acción a seguir,
- ii) la persona está justificada a creer que la acción: es analítica ó la persona puede comprobar directamente la acción ó la acción es una opinión científica vigente en el tiempo de la





- persona ó hay testimonios fiables de la acción; ó es deducible a partir de otras ideas y la persona esta justificada en creer ello.
- iii) la persona no es consciente de que la acción esté en contradicción con ninguna otra creencia, en este sentido la persona es lógicamente coherente con sus creencias y
 - iv) la persona considera que su creencia en la acción puede tendencialmente estar errada [este es un referente a la Teoría del Error (Caloca, 2012)]. En este sentido, una creencia razonable no falsa y tendencialmente errada cumple con lo anterior e implica que exista conocimiento limitado, cada vez que el conocimiento colectivo implica que se *conoce* algo, pero no todo.

Así, el paso del conocimiento individual para la elección implica un vínculo necesario con la colectividad, nunca elegimos libres del conocimiento colectivo, desde que nacemos dependendemos de los demás y estos nos van proveiendo de su conocimiento individual y colectivo, así, toda elección no es solo dependiente de la persona y su conocimiento individual depende del conocimiento colectivo.

Cuando hacemos un mal uso de la energía no depende solo de lo que creemos individualmente sino también de lo que hemos aprendido del conocimiento de los demás. Por ende, el paso de elecciones individuales a colectivas ocurre en un entorno

3.1. Cambio en las creencias cognitivas

El cambio en la información medio ambiental y en uso de la energía esta supeditada por la transformación de las creencias cognitivas consumistas por las sustentables. Esto se da a través de la modificación de creencias cognitivas por medio de la expansión, revisión y contracción. (Gärdenfors, 1992).

1) Expansión: En este caso una nueva creencia justificada sobre le mejor uso de la energía se suma al acervo de la persona sin rechazar creencias cognitivas anteriores de tipo consumista a menos que entren en contradicción con las nuevas creencias cognitivas sustentables.

2) Revisión: esta corresponde con una nueva creencia justificada y sus consecuencias, las cuales se adicionan al acervo cultural de la persona en función de nueva información obtenida. Pero, en la idea de mantener consistencia entre las creencias justificadas sustentables únicamente las creencias viejas consumistas son rechazadas.

3) Contracción: en la contracción algunas viejas creencias justificadas consumistas y sus consecuencias son rechazadas sin la aceptación de nuevas creencias justificadas sustentables (Gärdenfors, 1992). En este sentido, son transformadas las creencias cognitivas consumistas por las creencias cognitivas sustentables.

Así, la cantidad específica de memes de creencias cognitivas sustentables, que cualitativamente son diferentes y por ende, se pueden comparar y ordenar conforman la vida social y por ende cultural de una nación o el planeta. En este caso nos referimos a la acción individual, empero, las creencias colectivas llevan a acciones colectivas con base en los memes de conocimiento común colectivo.

Donde todas y cada una de las acciones e inacciones individuales conllevan a una transformación en acciones colectivas a través de la interacción social. Ahora, yo tengo una gran variedad de deseos y entre ellos prefiero unos a otros junto con las restricciones o el conocimiento limitado que se tiene para concretar la satisfacción de dichos deseos, los cuales nos indican la motivación para la acción.

En este caso se desea sobre las creencias limitadas, razonables no falsas y tendientes al error consumistas a ser transformadas por unas creencias razonables no falsas y tendientes al error sustentables, sujeto a el conjunto de restricciones sobre nuestras oportunidades para alcanzar dichos deseos esperados, y estructurado en un contexto determinado por la intersección de nuestros memes individuales con los colectivos, que permiten adaptarnos a una gran variedad de situaciones, aunque momentáneamente no a todas. Es decir, comprende la opción de información cultural, que implica que la información o el conjunto de información del persona y sobre el que adapta sus deseos ya no es individual sino colectivo y por ende, los memes a elegir serán transformados de los individuales a los colectivos, y con ello el persona se adapta a esta nueva situación sustentable y de uso eficiente de la energía.

Que garantiza la conexión entre múltiples acciones de la persona consigo y con los otros miembros de la colectividad o el planeta, que se da por la interacción del persona al formarse su identidad buena o mala moralmente, a través de la interacción con las otras personas. Así, la persona puede transformar, al participar de la colectividad, sus deseos individuales por los colectivos y cooperar para el bienestar si la colectividad ésta orientada por identidades buenas moralmente siendo su deseo empático participar de una mejor y más eficiente sustentabilidad en el uso de la energía.





4. USO DE LA ENERGÍA: PRODUCCIÓN Y CONSUMO

Esencialmente el uso de la energía marca la primera pauta para la selección inversa de las transformaciones de la temperatura en el planeta, es decir, el calentamiento global depende en gran medida de un uso ineficiente o sustentable de la energía. Donde, la energía a nivel interacción humana depende de detentar un consumismo desmedido a pautas de sustentabilidad.

Pero, la esencia del excesivo consumismo radica en dos movimientos; una producción no selectiva de bienes y servicios con un uso desmedido y malogrado de la energía y, segundo, un consumo desmedido de dichos productos. Los empresarios están dispuestos a ofrecer cualquier cantidad de mercancías que les plazca sin restricción alguna, siempre y cuando no agoten los recursos renovables y no renovables, ni la eficiencia en el uso de la energía. Es decir, construyen su curva de oferta con un uso mal logrado y desmedido de la energía. Por el lado del consumidor se tiene que a cada nivel de precios los consumidores están dispuestos a demandar cualquier cantidad de mercancías que les plazca, si su restricción presupuestaria no les limita en la adquisición de bienes producidos ineficientemente en materia del uso de la energía, con ello consumiendo energía usada de manera ineficiente. Lo cual indica que construyen su curva de demanda con un consumo mal logrado y desmedido de la energía. Lo que da lugar al modo de vida imperial (Sato: 2022)

Ahora bien, el considerar la construcción de la curva de oferta y de la curva de demanda conlleva que tanto los productores como los consumidores en realidad hacen un consumo malogrado, desmedido e ineficiente de la energía y a este proceso aunado a su voluntad para no cambiar tal situación se le identifica como la formación de creencias consumistas o creencias consumistas de energía no sustentables. Esto debe de ser transformado como se menciono más arriba por creencias cognitivas razonables no falsas y tendientes al error sustentables.

Estas creencias cognitivas sustentables implican procesos donde tanto los consumidores como los productores no solo toman en cuenta la lógica del mercado, sino también las emociones, el contexto cultural, la axiología y la empatía. Logrando con ello que todo producto que no cumpla con las especificaciones de las creencias cognitivas sustentables introyectadas en los consumidores no sea demandado por estos, provocando una presión en los productores de tales productos para que transformen sus deficientes usos de la energía no sustentable.

Así, el mercado castiga los usos malogrados, desmedidos e ineficientes del uso de la energía vía la

transformación cultural, primero, de los consumidores y posteriormente de los productores, con ello los memes colectivos y/o sociales del planeta seran paulatinamente transformados y por ende, los memes o unidades básicas de información cultural individuales también serán construidos y reforzados con una versión no egoísta o consumista sino sustentable.

Si bien esta es una alternativa factible no hay que menospreciar sus límites, los cuales están guiados por la capacidad personal de lograr la empatía entre los seres humanos. La empatía en el individuo no es de largo plazo, sólo se atiende a ella en situaciones de desastre con una visión local.

5. CONCLUSIONES

Las reflexiones finales son las siguientes: Primero, el principio de sustentabilidad en el que se considera que el estado de la cuestión se mantenga constante para las generaciones futuras no es adecuado, y su transformación tiene que llevarse a cabo bajo el precepto de que es necesario revertir en la teoría económica, la idea de que el consumidor se sujeta aún principio de insaciabilidad es equivocada. En segundo lugar se tiene que el mercado permite la determinación de precios no intervenidos: como los subsidios, para permitir que los precios reflejen que todo aquel que contamine o reduzca las reservas naturales pague de acuerdo con el daño ocasionado. Tercero, son necesarias dos tipos de transformaciones para la atención del problema ambiental: 1) la tecnológica y 2) la de los valores (Figueres/Rivett-Carnac 2021). Cada una enfrenta retos, la primera implica que se transformen las prácticas con tecnología que maximiza el desperdicio y los usos de energía, si bien en principio esto tiene un costo mayor en el largo plazo ello beneficia no sólo a quienes realizan la adecuación sino también a las generaciones futuras. La segunda, ofrece una transformación de los valores, enfrentando el reto de vencer el nihilismo conductual en el que han caído un sin número de las nuevas generaciones en su búsqueda del placer por el placer.

REFERENCIAS

- Caloca, O. Desde el individuo racional al individuo bajo creencia, un mecanismo de elección, en: revista Economía Teoría y Práctica número 37. UAM-Iztapalapa, (2012).
- Caloca, O., C. Leriche y V. Sosa. Crítica de la economía ortodoxa desde una visión culturalista, la economía solidaria, en: Reyes, Marissa, Jorge Linares y Marco





- Vinicio Ferruzca (coords.) *Economía y Cultura*, México: UAM-A, (2016)
- Intermón. *Una tierra para todos*. Octaedro, (1998).
- Meadows, D., et al. *Los límites del crecimiento*. FCE, (1971).
- Mosterín, J. *Racionalidad y acción humana*. Alianza, (1978).
- Panayotou, Th. *Ecología, medio ambiente y desarrollo: debate crecimiento versus conservación*. Gernika, (1994).
- Christiana Figueres /Tom Rivett-Carnac. *El futuro por decidir*. (2021). Debate.
- Saito; Kohei. *El capital en la era del antropoceno*. Penguin Random (2022).





Characterization and research data of a thermoelectric panel using the seebeck effect with sun energy

ARTURO MORENO GUTIERREZ¹

¹Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Programa de energía. San Lorenzo 290 Street, Benito Juárez, México City, 03100, México.

Corresponding author: Arturo Moreno Gutiérrez (e-mail: arturo.moreno.gutierrez@estudiante.uacm.edu.mx).

This work was supported partially (2019-II semester) by UACM under institutional grant.

ABSTRACT Within the search for new forms of electricity generation there are unconventional means from which it is possible to obtain energy, in this case to obtain electricity from the energy of our Sun through a thermoelectric effect called Seebeck effect. This with the purpose of offering an energetic alternative to reduce global warming produced mainly by the emission of greenhouse gases such as CO₂, a product of the use of non-renewable energy sources such as oil.

The focus of this research work was based on the use of the Seebeck effect to generate electricity, using a panel composed of thermoelectric cells designed to generate Electric Power. This requires verification of the effect as such in the generation of electricity. As well the data log allowed statistical analysis between the study variables, the parameters obtained such as the Seebeck coefficient and the Figure of Merit (ZT). This made it possible to establish the level of relation between them in order to establish their characteristic performance.

This study was carried out under real operating conditions that influence the performance and relationship between study variables. This allows to expand and have a better understanding of the interaction of solar energy

with thermoelectric cells. Offering the most relevant and outstanding results of electric generation of this study.

INDEX TERMS Keywords: electric generator, Seebeck effect, solar energy, thermoelectric panel.

I. INTRODUCTION

Electricity generation has always been a challenge that require infrastructure, equipment and mechanisms to produce it. Historically, it has primarily been generated from hydroelectric, thermoelectric, and geothermal plants. Due to environmental impact and technological development, renewable energy and electricity generation methods have begun to be adopted, among which the sun has been used as an energy source. Photovoltaic panels or solar collectors are examples of this.

There are different and diverse physical effects that produce electricity, among which there is a very particular one called the Seebeck effect, which is not very known in the energy field of renewable energies.





The Seebeck effect was discovered in the first half of the 19th century by Thomas Johann Seebeck, who exposed the junction of two conductors of different materials to heat, which produced an electric current flow that he called the thermomagnetic effect. Jean Charles Peltier, in the 19th century also, experimented by applying an electric current to the junction of two different conductors, causing a temperature difference at the junctions of the circuit, the opposite effect to the Seebeck effect [1].

Currently thermoelectric Peltier cells are used in electronic applications to refrigerate electronic circuits and microprocessors. However, the Seebeck effect also occurs in the device due to a temperature difference between on both surfaces [2][3].

The following study and results are the product of the development of the Master research thesis [4], which implement, applied and seeks to further understand the Seebeck effect and its practical application in renewable energy by designing a thermoelectric panel to generate electricity using solar energy as the energy source.

As previously stated with the aim of understanding the characteristic performance of the Seebeck effect in power generation under real operating conditions, the proposed study variables, and their interaction with solar irradiance. Also, to understand their behavior and use in relation to thermoelectric parameters, statistical methods were applied to the data obtained and conclusions drawn from the study.

It is important to mention that the Master thesis research study realized [4], which took several years to develop, structure and formalities process, has no precedents or previous work related to the Seebeck effect focused on renewable energy within the university and energy program of the UACM.

II. MATERIALS AND METHODS

The research study was carry out in Mexico City, with clear weather conditions expected from 10:30am to 15:51pm (measurement time). However, partly sunny, partly cloudy and overcast conditions also occurred, which will help to complete and expand the power generation analysis of the thermoelectric panel designed for this research study.

To carry out this study, it was necessary to design and develop a thermoelectric panel that consists of a rough blackened aluminum surface (hot side that receives solar irradiance) coupled a circuit with of Peltier thermoelectric cells TEC1-12706 (4) [3]. On the other side of the circuit, a heat sink for cooling is mounted, to cause the differential temperature [5] and thus produce the Seebeck effect. Temperature tests points were implemented on both sides of the panel to record data.

To study the power generation performance of the thermoelectric panel, a quantitative methodology was used in the data recording, as well tabulation, graphical representation and statistical procedures for data analysis were applied. The measure of solar irradiance was compared with data calculated for a sunny day model with approximate results.

As part of the methodology, a flowchart of the measurement process for the proposed research study was implemented. The Pearson method was used with Excel to plot and calculate the classification and determination of coefficients statistically.

This proposal is an alternative that provides electrical energy, although of low magnitude can be increased with different numbers of cells. The thermoelectric panel acquires heat through solar radiation, transmits it through conduction to the thermoelectric cells, and passively dissipates it through convection.

The thermoelectric panel was exposed to solar irradiance in sunny weather conditions. A



pyranometer, digital multimeter and thermometer were used to measure solar irradiance, the potential difference, electric current and temperature at the test points on both sides of the thermoelectric panel respectively (Figure 1). Later, the measurements obtained were used to tabulate the data and perform statistical analysis for graphical representation. Followed by correlation analysis to determine the relationship between the study variables with Seebeck Coefficient and Figure of merit ZT to determine and conclude the characteristic performance of the thermoelectric panel.



FIGURE 1. Measuring instruments and panel thermoelectric.

EQUATIONS

Next equations were used to calculate variables and coefficients and gradients:

$$\text{Electric Power (W)} = VI \quad (1)$$

$$\text{Energy (Wh)} = Wh \quad (2)$$

$$S = \Delta V / \Delta T \text{ . Seebeck coefficient expressed in } (\mu V/^{\circ}K) \text{ or } (mV/^{\circ}K). \quad (3)$$

$$ZT = S^2 \sigma T / \kappa \text{ . Figure of Merit, dimensionless} \quad (4)$$

Where:

S^2 : the square of the value of the Seebeck coefficient expressed ($mV/^{\circ}K$).

σ : represents the electrical conductivity of the thermoelectric material expressed in (S/m).

κ : means the thermal conductivity of the thermoelectric material ($mV/^{\circ}K$).

T: Temperature ($^{\circ}K$).

III. RESULTS AND DISCUSION

These results show comparative curves with the most notable data from the applied methods.

As shown in Figure 2, shows the performance of the electric power measurement as a function of solar irradiance, where a more stable performance can be observed in sunny conditions (window) in opposite with decreasing behavior in partly sunny, partly cloudy and cloudy conditions.

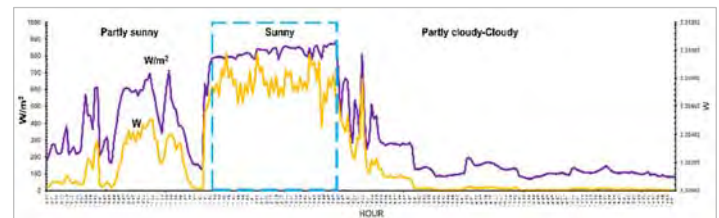


FIGURE 2. Solar irradiance vs Electric power.

As illustrated in Figure 3, it can be seen that when there are sunny conditions, the temperature differential is more stable and the electrical power is the same (window).

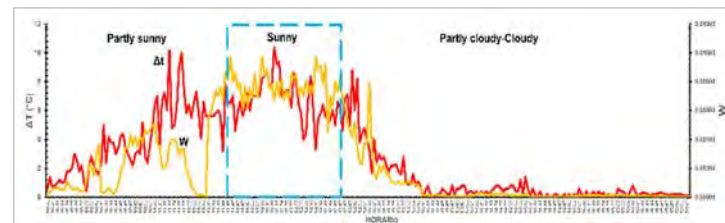


FIGURE 3. Temperature differential vs Electric power.

As can be seen in Figure 4, shows the performance of electric current generation and potential difference, with sunny conditions offers the highest generation values inside the window.

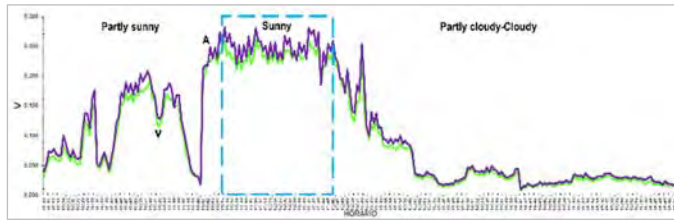


FIGURE 4. Potential difference vs Electric current.

As illustrated in Figure 5, shows the temperature performance curve on both sides of the thermoelectric panel during the data measurement process, with more stable performance in sunny conditions (window).

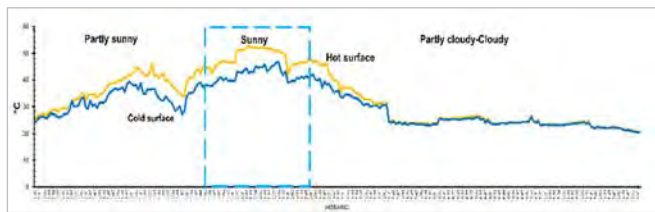


FIGURE 5. Hot side vs Cold side.

The most significant data obtained were: Solar irradiance 841 W/m^2 , Temperature hot side: 61.4°C , Temperature cold side 43.2°C , Differential of temperature: 8.2°C , Potential difference: 281 mV , Electric current: 37.3 mA , Electric power: 9.7 mW , Energy produced: 0.08 mWh , Seebeck Coefficient $0.928 \text{ mV}/^\circ\text{K}$, Figure of merit ZT : 0.169 dimensionless. Table 1 shows the most notable data results from the measurement process as seen on the curves.

TABLE 1. Highest data obtained.

Study variables	Solar irradiance	Temperature	Temperature	Temperature	Seebeck
Unit	W/m^2	Hot side	Cold side	differential	Coefficient
Magnitude	841.9	61.4	43.2	8.2	0.928
Study variables	Potential difference	Electric current	Electric power	Energy produced	Figure of merit ZT
Unit	mV	mA	mW	mWh	Dimensionless
Magnitude	261	37.3	9.7	0.08	0.169

RESULTS OBTAINED WITH A NON-RENEWABLE ENERGY SOURCE

Based on outstanding results from the measurements and the analysis of the data

obtained, the thermoelectric panel was tested with a non-renewable energy source (LP gas) using a burner to better understand the behavior of the power generation process. Remarkable data were obtained, which, although short-lived, were very important, verifying and confirming the achievable generation level. This was a destructive test that provided valuable data on the power generation cutoff levels and temperatures reached.

As shown in the Table 2, the data obtained from the measurement of power generation with a non-renewable energy source. At minute six, maximum power generation and temperature values were reached: Potential difference: 2.690 V , Electric current: 0.285 A , Electric power: 0.767 W , Temperature hot side: 84.6°C , Temperature cold side: 71.9°C and Temperature differential: 12.7°C .

TABLE 2. Results with non-renewable energy source.

Minute	1	2	3	4	5	6
Potential difference (V)	0.140	0.298	1.880	2.450	2.640	2.690
Electric current (A)	0.036	0.075	0.273	0.303	0.295	0.285
Electric power (W)	0.005	0.022	0.513	0.742	0.779	0.767
Temperature hot side ($^\circ\text{C}$)	24	31	35.4	49	56.7	84.6
Temperature cold side ($^\circ\text{C}$)	20	26.8	32.8	40.4	45.6	71.9
Temperature differential Δt ($^\circ\text{C}$)	4	4.2	2.6	8.6	11.1	12.7

STATISTICAL ANALYSIS

To understand the relationship and performance of the study variables with solar irradiance as well as thermoelectric gradients such as the Seebeck coefficient and the Figure of Merit (ZT), statistical correlation analyses were performed, obtaining the following result in Figure 6, this shows the increase in potential differential as a function of solar irradiance. The correlation coefficient is 0.9817 and the coefficient of determination is 96.37% , reflecting the high utilization of solar resources.

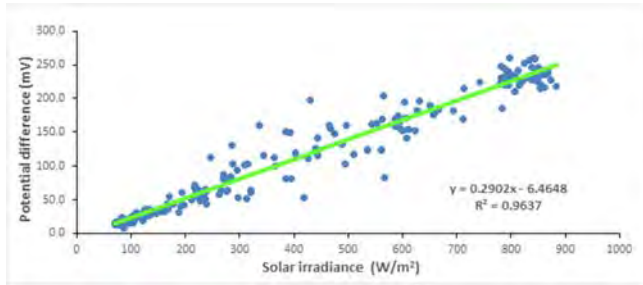


FIGURE 6. Solar irradiance vs Potential difference.

As illustrated in Figure 7, shows the increase in electrical power as a function of solar irradiance with a correlation coefficient of 0.9614 and a coefficient of determination of 92.43%, indicating the high level of utilization of the solar resource.

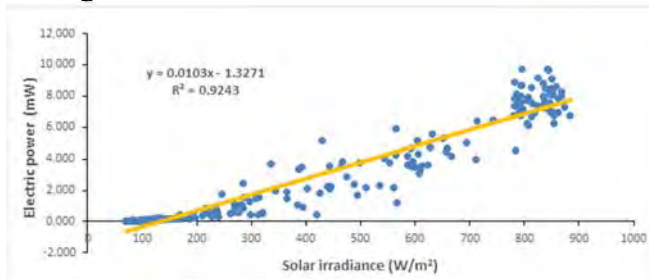


FIGURE 7. Solar irradiance vs Electric power.

As illustrated in Figure 8, shows the analysis of the high relationship between Seebeck coefficient (S) as a function of the potential difference (mV) with a correlation coefficient of 0.9999 and a determination coefficient of 99.99%, which is a high performance of the Bi_2Te_3 as a thermoelectric material.

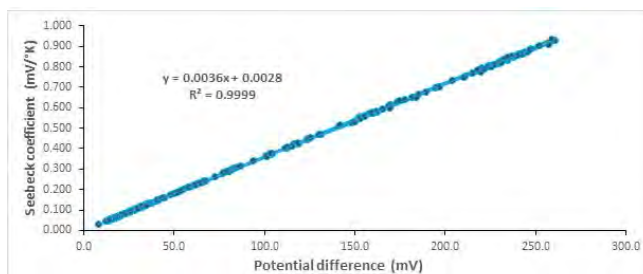


FIGURE 8. Potential difference vs Seebeck coefficient.

As shown in Figure 9, shows the performance of the Figure of Merit (ZT) as a function of the Seebeck coefficient. It shows a response with hyperbolic trend of the curve. The ZT parameter, depending on the different variables and in conjunction with the thermal and electrical coefficients of the thermoelectric material, exhibits different responses to solar irradiance. Therefore, the performance is statistically nonlinear.

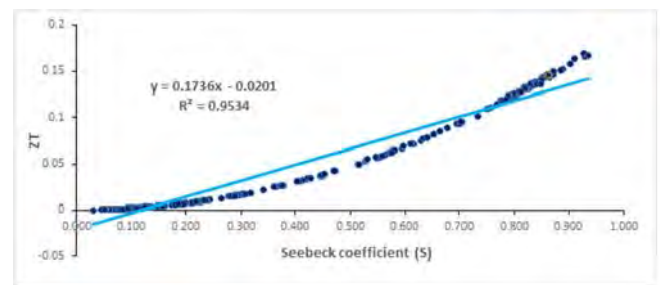


FIGURE 9. Seebeck coefficient vs Figure of merit ZT.

As shown in Figure 10, shows the performance of the thermoelectric material expressed with the Figure of Merit (ZT) as a function of solar irradiance, with a correlation coefficient of 0.9610 and a coefficient of determination of 92.36%. The percentage represents the high use of the solar resource.

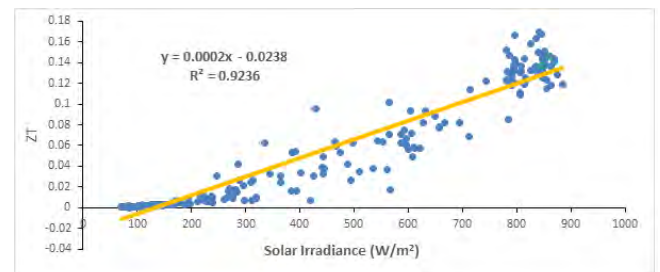


FIGURE 10. Solar irradiance vs Figure of merit ZT.

IV. CONCLUSIONS

It is concluded that the presence of solar direct irradiance causes the Seebeck effect in the thermoelectric panel, and the solar irradiance





levels influenced the variation in the electrical power obtained, confirming the electrical generation and the characteristics of the Seebeck effect. Therefore, sunny conditions provided the highest and most stable electrical generation data, while partly sunny, partly cloudy and cloudy conditions generated unstable or zero data.

The temperature differential shows different variations that are not always the same, which cannot be compared when is increasing (temperature rise) versus when it is stable (when the maximum temperature has been reached on the absorber plate) or decreasing (temperature decrease).

On the other hand, within the characteristics of electrical generation, important and variable results were observed in the use of solar energy and a non-renewable energy source as energy sources to generate the Seebeck effect. Where the temperature level in the hot surface as well as heat dissipation on the cold side are characteristics to be controlled that influence the magnitude of electrical generation. However, within the characteristics of the use of solar energy for electricity generation, the statistical analysis showed very important results of the relationship between the study variables based on solar irradiance and its utilization of over 90%, being positive and increasing among the variables studied as a function of solar irradiance, confirming the high use of electrical power with respect to the solar resource.

Another very important and outstanding feature of the Seebeck coefficient versus potential difference obtained is 99%, as shown in the statistical graph. The Seebeck coefficient was $0.928 \text{ mV}/^\circ\text{K}$, which is a high and outstanding efficiency value for the thermoelectric material (Bi_2Te_3). This means that 0.928 mV is generated for each degree Kelvin in the temperature differential.

The Figure of Merit (ZT) is 0.169, which is a function of actual temperature variations in the thermoelectric material and is an important

parameter of efficiency of the thermoelectric panel. If the ambient temperature value is used, a higher ZT would be obtained, close to 2, which is the maximum performance value for a thermoelectric material, in this case for Bi_2Te_3 [6].

The rough blackened surface of the thermoelectric panel, the conductive paste to couple the cells improve the heat conduction. The heatsink and the test points implemented for the data logger, were elements that helped in the generation and collection of data.

If an accumulated total of all the electrical power measurements were estimated during the measurement time of 5.33 hours, a generation power of 1.6 kWh would be obtained.

During the measurement and data recording process, a sudden peculiarity in the data variation was noticed due to the presence of a cloud that obstructed direct radiation. Showing a performance closer to a photoelectric effect response.

Therefore, it can be said that there is interaction in the behavior of energy in the form of a particle that produces the photoelectric effect, and simultaneously in the form of a wave as heat to originate the Seebeck effect with temperature differential, so it is concluded that the presence of both effects in the process of electrical generation, verifying the dual feature of the light in the same device (applying solar energy).

Another and important conclusion can be drawn from the above: when the photoelectric effect was first discovered by Albert Einstein, which earned him the Nobel Prize in 1921, for some reason the Seebeck effect was not mentioned. This principle should have been included to complement and verify the dual characteristic of the light in his work.

ACKNOWLEDGMENTS

Special thanks to B.E. Gutiérrez Binnquist for financing this work.





Thanks to E. Ruíz Schneider (UNAM) and A. Lentz Herrera (UACM).

Thanks to G. Lara Lucario (UNAM) in technical aspects also.

REFERENCES

- [1]. Rubio, C. Martheyn, G. Vera, E. (2017). Thermoelectricity: the use of Peltier cells in refrigeration and their main applications. *Inventum magazine*, 12(22), pp. 9-16.
- [2]. Radovan, H. Martin, P. Lukáš, R. (2016). Analysis of the Appropriateness of the Use of Peltier Cells as Energy Sources. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. 16(6): pp.760. DOI: [10.3390/s16060760](https://doi.org/10.3390/s16060760).
- [3]. Chen, J., Li, K., Liu, C., Li, M., Lv, Y., Jia, L., & Jiang, S. (2017). Enhanced Efficiency of Thermoelectric Generator by Optimizing Mechanical and Electrical Structures. *Energies*. Vol. 10, pp. 1329. <https://doi.org/10.3390/en10091329>
- [4]. Moreno, A. (2024). *Harnessing solar energy through the Seebeck effect using thermoelectric cells*. [Novel Master thesis]. Universidad Autónoma de la Ciudad de México.
- [5]. Sonal, R. Yashika, B. Shikhar, P. Shubham, S. (2017). A review on Generation of Electricity using Peltier Module. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 6(1), pp. 453-457.
- [6]. Sumiga, I. Srpak, D. Kondić, Ž. (2018). Application of Thermoelectric Modules as Renewable Energy Sources. *Technical Journal / Tehnicki Glasnik*, 12(3), pp. 151–158. <https://doi.org/10.31803/tg20180301181527>



FIRST AUTHOR. Electrical and Electronic Mechanical Engineer (UNAM). Master degree in Renewable Energy (UACM). Engineering work in astronomical instrumentation for observatories in Mexico, Brazil, Chile, Spain and Hawaii. He has also published international publications for these projects. He also worked in marine research instrumentation (UNAM). Currently involved in scientific divulgation, postgraduate studies and freelance work.





Degradación fotocatalítica de carbamazepina utilizando nanopartículas de ZnO

FLOR CELESTE CASTRO REYES¹, MARÍA EUGENIA HERNÁNDEZ TERÁN², JOSÉ ANTONIO COLIN LUNA²

¹ Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 420, Nueva el Rosario, Azcapotzalco, Ciudad de México, 02128, México.

² Departamento de Energía/Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, 02200, CDMX, México.

Autor de Correspondencia: José Antonio Colin Luna (e-mail: jacol@azc.uam.mx).

RESUMEN La carbamazepina (CBZ) es un medicamento antiepiléptico y para otros trastornos neuronales. Su consumo mundial es de más de mil toneladas al año, provocando que se encuentre en cuerpos de agua superficiales y subterráneos en diversas partes del mundo debido también a su inefectiva remoción por tratamientos convencionales en aguas residuales y a su resistencia a la atenuación natural. Por tanto, en el presente estudio, se investigó la eficiencia de la fotodegradación de catalizadores nanoestructurados de ZnO con diferentes tamaños de cristalito (48.56 nm, 39.74 nm y 25.7 nm) sobre la remoción de CBZ. Se estudiaron los efectos del pH, de la concentración del catalizador y de la concentración del precursor (H_2O_2) sobre la eficiencia de fotodegradación. Se encontró una mayor eficiencia de degradación de CBZ con el catalizador con un tamaño de cristalito de 25.7 nm y condiciones ambientales de pH 8, 0.4 ml de H_2O_2 y 2 g/L de nanocatalizador. Mediante DRX se determinó la estructura de ZnO hexagonal tipo Würzita y el tamaño de los cristalitos de los tres catalizadores,

PALABRAS CLAVE: Fotocatálisis, ZnO, contaminantes emergentes, carbamazepina, degradación.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan al mundo entero. Un contaminante emergente (CE) es una sustancia química que se encuentra en el medio ambiente y cuya persistencia o potencial de impacto negativo en los ecosistemas y la salud del entorno no está completamente estudiada y, por lo tanto, no está regulada por legislaciones en la mayoría de los países.

El tratamiento del agua contaminada con los llamados CE o disruptores endocrinos es muy difícil de efectuar debido a que dentro de estos compuestos orgánicos se encuentran los medicamentos, los cuales son contaminantes

recalcitrantes y presentan una gran estabilidad química y resistencia a los procesos de oxidación microbológica [1].

Diariamente, en todo el mundo, se descargan grandes volúmenes de agua con residuos de estos medicamentos y sus metabolitos por los drenajes domésticos, farmacéuticos y hospitalarios. Dentro de estos medicamentos se encuentran los antibióticos, anticonceptivos, analgésicos, antiácidos, etc. Estos fármacos no pueden ser eliminados en los tratamientos de las plantas de aguas residuales convencionales y sus residuos continúan en los efluentes de los tratamientos secundarios, debido a que estas tecnologías no fueron diseñadas para este grupo de contaminantes [2].

Después de un tratamiento secundario, los CE aún se encuentran presentes en aguas subterráneas y aguas superficiales, por lo que es importante contar con nuevos procesos químicos, económicos y eficientes para degradar estos compuestos antes de que puedan entrar en contacto con los ecosistemas y con el hombre.

Existen varios procesos enfocados en la eliminación de contaminantes emergentes; entre los métodos más utilizados destacan el uso de agentes químicos, filtración a través de membranas, precipitación, floculación, adsorción y oxidación química. Sin embargo, no todos estos métodos convencionales son eficaces, presentan limitaciones como costo elevado y la generación de subproductos secundarios no deseados, por ejemplo, con alta toxicidad.

1.1. Carbamazepina

La CBZ es un fármaco psicotrópico y antiepiléptico que no solo se utiliza para tratar las crisis epilépticas, sino también para tratar el dolor de la neuralgia del trigémino y el trastorno bipolar. Tanto los psicofármacos como las drogas ilícitas tienen el potencial de alterar los llamados "infoquímicos", que son compuestos utilizados para las comunicaciones intraespecies (por ejemplo, navegación, evitar depredadores, comportamiento de apareamiento, etc.), ya que los



psicofármacos pueden imitar la estructura de los infoquímicos naturales.

La CBZ es una de las sustancias detectadas con una frecuencia del 78.5 % en las aguas superficiales europeas y del 61.4 % a nivel mundial [3]. Su presencia en aguas como uno de los contaminantes emergentes más recurrentes se puede observar en la **Figura 1**. Los contaminantes de los lodos de depuradora incluyen un 19 % de diuréticos, entre un 16 % y un 21 % de agentes modificadores de lípidos, hidroclorotiazida, diclofenaco, furosemida, claritromicina, atorvastatina y carbamazepina [4].

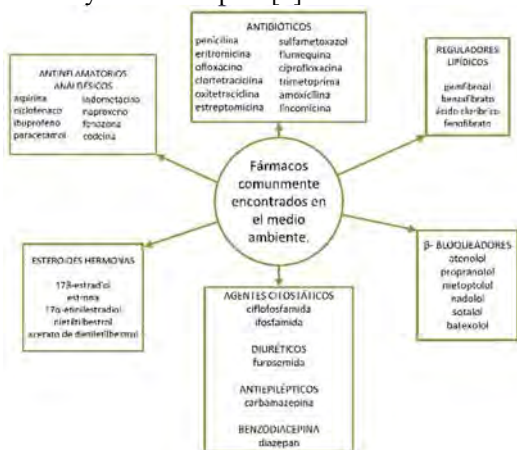


FIGURA 1. Productos farmacéuticos frecuentemente encontrados en el medio ambiente.

En el consumo humano, aproximadamente el 72 % de la dosis aplicada se recupera en la orina, y solo el 2 % de esa dosis se encuentra como CBZ inalterado. El 28% que se absorbe por el tracto gastrointestinal se recupera en las heces, 14 % en forma de metabolitos y el resto sin alterar [5]. La CBZ es frecuentemente encontrada en aguas residuales en un rango de concentraciones que van desde ng/l hasta mg/l (Tabla 1).

TABLA 1. Algunos países en los que se ha encontrado CBZ en distintos tipos de aguas residuales.

País	Concentración (µg/l)	Tipo de agua	Referencia
China	0.339-0.428	Aguas residuales	[6]
(Taiwán)		hospitalarias	
Suecia	0.580-2.6	Aguas Residuales	[7]
		Municipales	
Suiza	0.482	Aguas Residuales	[8]
		Municipales	
Israel	840 ± 190	Aguas residuales	[9]
		farmacéuticas	
India	442 080 ± 2 580	Aguas residuales	[10]
		farmacéuticas	

México	5.68 ± 0.52	Aguas residuales	[11]
(Ciudad de México)		hospitalarias	
España	4.12 ± 0.31	Aguas residuales	[12-15]
		hospitalarias	

Dentro de los nuevos procesos que se han propuesto para eliminar los contaminantes emergentes se encuentra la degradación fotocatalítica debido a la reusabilidad de los catalizadores, la degradación completa, el bajo costo y que es amigable con el ecosistema.

1.2. Fotocatálisis

La fotocatalisis es una opción atractiva, pues el compuesto orgánico puede degradarse hasta la mineralización completa, es decir, hasta la producción de CO₂. La otra ventaja es que no se requieren altos consumos de energía, pues la reacción se lleva a cabo a temperatura ambiente, por lo que este proceso es económico y sustentable.

1.3. Catalizador de óxido de cinc

El óxido de cinc (ZnO) es un semiconductor que puede actuar como un fotocatalizador, por lo que podría utilizarse en la degradación de medicamentos contaminantes. El ZnO tiene la capacidad de absorber menos del cinco por ciento de la luz solar y esto ha limitado sus aplicaciones en técnicas oxidativas para la degradación de contaminantes emergentes. Debido a que el ZnO es estable electroquímicamente, tiene una alta capacidad oxidativa, bajo costo, alta sensibilidad óptica, naturaleza no tóxica para las células humanas a bajas concentraciones y propiedades antibacterianas frente a diferentes microorganismos, puede ser un fotocatalizador prometedor en reacciones de degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes.

Es por ello, que en este trabajo se evaluaron catalizadores de ZnO nanoestructurados en la fotodegradación de CBZ bajo radiación UV-visible. El efecto de diferentes parámetros sobre la velocidad de fotodegradación, tales como la cantidad del catalizador, tamaño de partícula de ZnO, exposición de tiempo de radiación, pH de la solución, concentración inicial de la CBZ, masa del catalizador y contenido de precursor (H₂O₂), fue estudiado.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Reactivos

Se utilizaron nitrato de cinc hexahidratado (Zn(NO₃)₂·6H₂O) como precursor de óxido de cinc (ZnO), hidróxido de sodio (NaOH), ambos del laboratorio Sigma-Aldrich. La carbamazepina se purificó a partir de pastillas comerciales del laboratorio PSICOFARMA.

```

graph TD
    INICIO([INICIO]) --> PULV[PULVIFICAR PASTILLAS EN MORTERO]
    PULV --> MEZC[MEZCLACIÓN MANUSCRITA SUAVE]
    MEZC --> FILT[FILTRAR EN CULATA]
    FILT --> COL[COLOCAR EN VEDRO DE VIDRIO]
    COL --> SEC[SECAR A TEMPERATURA AMBIENTE]
    SEC --> DES[2 DIAS EN DESHUMIDE]
    DES --> VER[PRUEBAS DE VERIFICACIÓN]
    ET[ETANOL CALIENTE 60°C] --> MEZC
  
```

Para ello, se trituraron 2 pastillas en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino. Se agregó a 5 ml de etanol grado analítico previamente calentado a 60°C, con agitación constante sin turbulencia. Después de 20 minutos, se filtraron al vacío. Se utilizó baño maría con agitación para evaporar el etanol, una vez evaporado el etanol, se agregó agua destilada para lavar los cristales.

Se dejó enfriar a temperatura ambiente, se filtró de nuevo con el mismo sistema, se colocaron los cristales recuperados en un vidrio de reloj y finalmente se dejaron en un desecante por 2 días. (Figura 3)

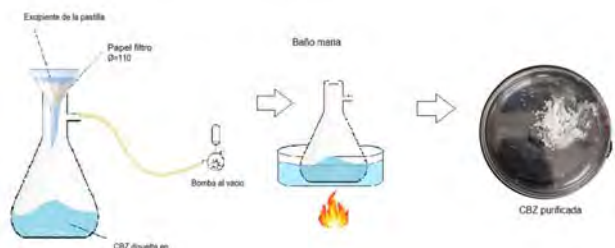


FIGURA 3. Sistema de recrystalización de CBZ comercial.

Para comprobar la pureza de la CBZ después de la recrystalización, se midió el punto de fusión en un equipo MP30 de Mettler Toledo. Además, se obtuvieron datos espectrales de esta misma muestra, para lo cual se utilizó un espectrofotómetro FTIR Bruker Alpha, analizando una región de escaneo de 400 a 4000 cm^{-1} ; también se obtuvieron los espectros de UV-Vis de la CBZ antes y después de la recrystalización, para lo cual se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis (Perkin-Elmer lambda 35) en un rango de escaneo desde los 200 hasta los 700 nm.

Las nanopartículas de ZnO se sintetizaron mediante el método de precipitación. Para ello, se preparó una solución acuosa de 0.375 M de nitrato de cinc ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), disolviendo 3 g del precursor en 80 mL de agua desionizada con agitación magnética durante 60 min a una temperatura de 80 °C. Posteriormente, se le añadió una solución de NaOH a la solución de nitrato de zinc, seguida de calentamiento a tres temperaturas a 24°C, 50°C y 80°C, durante 60 min, manteniendo el pH en 11.

Después de este tiempo, el precipitado se dejó reposar durante 48 h a temperatura ambiente para posteriormente lavarse con agua desionizada, 3-4 veces, para eliminar cualquier impureza hasta alcanzar un pH de 7. Posteriormente, se lavaron las muestras con etanol. El precipitado de ZnO se filtró y secó a 80°C por 24 h y finalmente se calcinó a 550 °C por 2 h.

La fase cristalina de los catalizadores fue determinada por difracción de rayos X (DRX) con un difractómetro Siemens DACO-MP D-500 usando como fuente de radiación $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$), el voltaje del tubo y la corriente fueron de 35 kV y 20 mA en un intervalo de barrido de 2θ de 20 a 80° , a un tamaño de paso de 2θ de $0.03^\circ/\text{min}$. La identificación de las fases se hizo comparando los difractogramas de los compuestos de estudio con las tarjetas cristalográficas JCPDS. El tamaño promedio del cristalito se estimó considerando el ancho promedio a media altura de los primeros picos de los difractogramas de rayos X de la estructura del ZnO con mayor intensidad a $2\theta = 31.8^\circ$, 34.54° , 36.34° , 47.76° y 56.74° y se utilizó la fórmula de Debye-Scherrer para estimar el tamaño de partícula.

Adicionalmente, la carbamezepina fue analizada por FTIR para identificar sus grupos funcionales empleando un espectrofotómetro FTIR Bruker en la región de 400 a 4000 cm^{-1} .

2.4. Pruebas de reacción

La reacción se realizó en medio acuoso a 25°C bajo irradiación de luz UV. El sistema está compuesto por un reactor cilíndrico de vidrio PIREX (Figura 4) encaquetado para mantener la solución a la temperatura deseada.

En contacto con la lámpara UV el pH se ajustó al valor requerido por una solución 1N de H_2SO_4 o una solución 1N de NaOH. El tiempo de reacción consistió en 30 min de adsorción, la cual se hizo en oscuridad, y 4.1 horas de reacción fotocatalítica con la lámpara prendida. Un termopar fue introducido dentro del reactor para monitorear la temperatura durante la irradiación. La mezcla del fármaco correspondiente y el catalizador estuvo sujeta a irradiación de UV mediante una lámpara de UV con una fuente nominal de 6W la cual emite una radiación de 365 nm. Para evitar la

interferencia de la luz del día, el reactor se forró con papel de aluminio y se puso en la oscuridad. Para monitorear la fotodegradación, se recolectó una alícuota de 3 mL, por lo que se tomaron alícuotas a 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 min. La concentración de los fármacos antes y durante la reacción fue analizada con un espectrómetro de UV-Vis de líquidos, monitoreando la intensidad de la banda de absorción de la CBZ.

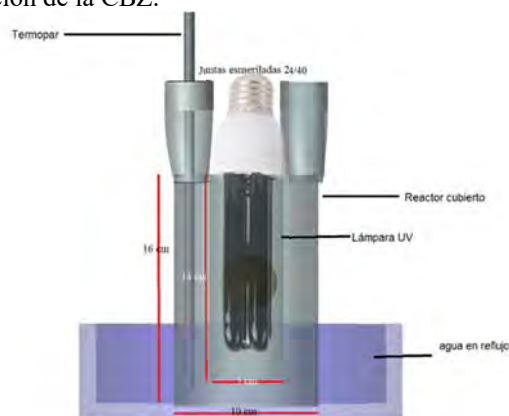


FIGURA 4. Sistema de reacción de degradación.

3. RESULTADOS

La pureza de la carbamazepina fue probada mediante cromatografía en capa fina, punto de fusión (Figura 5) y FT-IR (Figura 6). Estructura de la carbamazepina (Figura 7) y UV-Vis (Figura 8). El punto de fusión se obtuvo entre 189 y 193 °C.



FIGURA 5. Cromatografía de columna y prueba de punto de fusión de CBZ purificado.

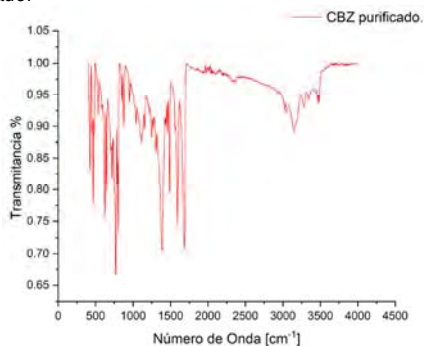


FIGURA 6. FTIR de CBZ purificado.

El espectro FTIR obtenido para la muestra purificada de carbamazepina (CBZ) muestra bandas de absorción

características que confirman la presencia de sus grupos funcionales principales. Se observan las bandas atribuidas al estiramiento N-H del grupo amida simétrico (3283 cm^{-1}) y asimétrico (3340 cm^{-1}), las bandas entre 3010 y 3200 cm^{-1} son atribuidas a las vibraciones C-H. Una banda intensa cerca de 1670 cm^{-1} corresponde al estiramiento del enlace C=O (carbonilo), mientras que las señales entre 1600 y 1450 cm^{-1} se asocian con vibraciones del anillo aromático. En la región de 1350 a 1266 cm^{-1} se identifican bandas correspondientes al estiramiento de aminas aromáticas. Las bandas entre 1245 y 1207 cm^{-1} corresponden a las vibraciones del estiramiento del enlace C-N; entre 1250 y 1020 cm^{-1} se asignan a las bandas de absorción medias a débiles para el enlace C-N no conjugado en aminas alifáticas primarias, secundarias y terciarias. Las bandas de absorción que aparecen en los espectros de bencenos sustituidos entre 675 y 801 cm^{-1} se atribuyen a la reflexión fuera del plano. Las bandas de IR entre 1020 y 1152 cm^{-1} son atribuidas a C-H en vibraciones de reflexión plana [16]. Estos resultados confirman la identidad estructural de la carbamazepina tras el proceso de purificación mediante cristalización. La Figura 7 muestra la estructura de la carbamazepina.

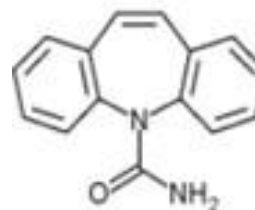


FIGURA 7. Estructura de la carbamazepina.

El espectro de UV-Vis de la carbamazepina pura se muestra en la Figura 8, obteniendo la longitud de onda máxima en 285 nm , característica de la CBZ.

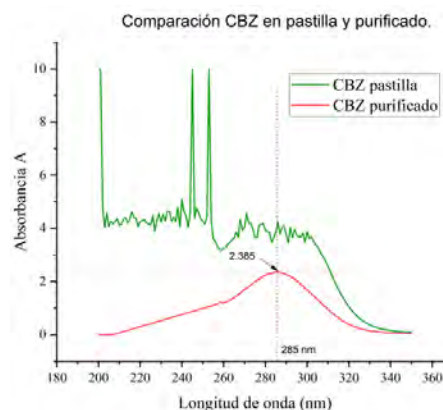


FIGURA 8. UV vis de CBZ en pastilla y purificado.

Estos resultados reafirman la pureza de la CBZ obtenida por el método de recristalización a partir del fármaco comercial, con el cual se realizaron las pruebas de reacción.

En la caracterización por FTIR de los nanocatalizadores de ZnO (Figura 9), las comparaciones reflejan que la muestra 3 destaca significativamente en la intensidad de sus picos.

El análisis comparativo de los espectros FTIR correspondientes a las muestras 1, 2 y 3 revela una banda intensa y bien definida alrededor de los 641.9 cm^{-1} en todas las muestras, atribuida al enlace Zn–O.

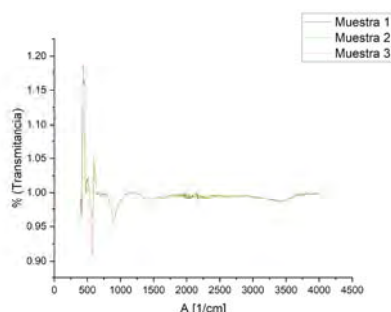


FIGURA 9. Comparación de FTIR de las muestras 1, 2 y 3 de ZnO sintetizado por medio de precipitación a distintas temperaturas.

La intensidad de esta banda es ligeramente mayor en la muestra 1, lo que sugiere una concentración marginalmente superior de ZnO o una mejor calidad espectral en esa muestra. Las muestras 1 y 2 presentan picos similares en esta región, lo que indica una composición comparable. En las regiones superiores del espectro ($1000\text{--}4000 \text{ cm}^{-1}$), no se observan bandas significativas, lo que sugiere la ausencia de impurezas orgánicas. La similitud en la forma e intensidad de los espectros confirma que las tres muestras contienen ZnO con alta pureza, y que las diferencias observadas son mínimas y posiblemente atribuibles a variaciones en el espesor o preparación de las muestras. Esta coincidencia espectral confirma la identidad del ZnO en la muestra analizada y respalda la eficacia del método de precipitación.

Se realizaron reacciones a varias cantidades de catalizador 0.5, 1, 1.5 y 2 g/L, de pH 4, 8 y 11 y concentraciones de H_2O_2 de 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 mL. Bajo estas condiciones, la muestra 3 (sintetizada a temperatura ambiente) mostró una degradación constante, mientras que la muestra 1 (sintetizada a 80°C) y la muestra 2 (sintetizada a 50°C) no mostraron una degradación considerable (no se muestran). La muestra 3 presentó la mayor degradación a pH 8, 2 g/L de catalizador y 0.4 mL de H_2O_2 comparado con los otros catalizadores lo cual podría deberse a que al disminuir el tamaño del cristalito (25.7 nm) se tiene una mayor relación superficie/volumen y más sitios activos para la reacción, por lo que en este trabajo se reporta

únicamente los resultados obtenidos con el nanocatalizador 3.

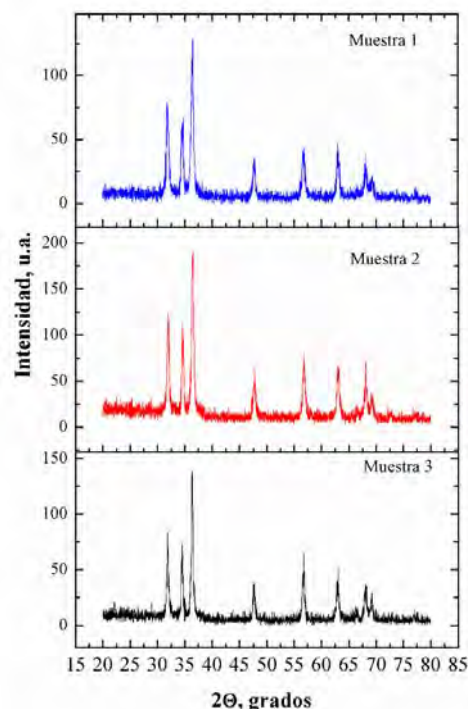


FIGURA 10. Difractograma de rayos X de los nanocatalizadores de ZnO.

Se evaluó la cinética de degradación de la CBZ con el catalizador con mayor degradación, constancia y tiempo de desactivación mediante espectrofotometría UV-Vis, analizando la disminución de la concentración en función del tiempo. Se construyó una curva de calibración en el rango de 2000 a 20000 ng/L, obteniendo una relación lineal entre absorbancia y concentración.

Primero se hizo la evaluación del ZnO muestra 3 del catalizador, sin ninguna modificación (sin precursor ni cambio de pH)

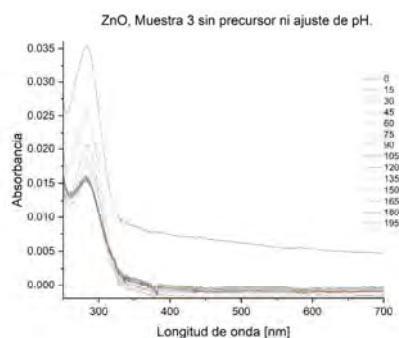


FIGURA 11. Reacción de degradación del nanocatalizador 3, sin ninguna modificación en pH y Precursor.

Los datos obtenidos nos muestran una degradación visible dentro de los primeros 90 minutos; después, una desactivación del catalizador. A partir de esto, se comenzaron a hacer cambios en el pH y el precursor. Los datos experimentales se ajustaron a modelos de reacción de orden 0, 1 y 2 (Tabla 3).

TABLA 3. Ajustes de modelo cinético de reacción de degradación de CBZ, con el nanocatalizador de ZnO muestra 3 y 0.4 ml de precursor de H_2O_2 .

Tiempo [min]	Absorbancia	Concentración [ng/L*min]	% Degradación	ln [C] [min ⁻¹]	1/[C] [L/ng*min]
0	0.02415	19860	0.0 %	9.89646294	5.03525E-05
15	0.02213	18940	4.6 %	9.84903137	5.27983E-05
30	0.01673	16710	15.7 %	9.72376262	5.98444E-05
45	0.01589	16180	18.5 %	9.69153119	6.18047E-05
60	0.01547	15960	19.6 %	9.67784087	6.26566E-05
75	0.01582	16160	18.6 %	9.69029433	6.18812E-05
90	0.01326	15270	23.1 %	9.6336454	6.54879E-05
105	0.01268	15030	24.3 %	9.61780348	6.65336E-05
150	0.01268	15030	24.3 %	9.61780348	6.65336E-05
165	0.0123	14930	24.8 %	9.61112789	6.69792E-05
180	0.01008	13850	30.2 %	9.53604051	7.22022E-05
195	0.00927	13460	32.2 %	9.5074776	7.42942E-05
210	0.00882	13280	33.2 %	9.49401442	7.53012E-05
225	0.0088	13270	33.2 %	9.49326113	7.5358E-05
240	0.00852	13150	33.8 %	9.48417704	7.60456E-05

El ajuste cinético de la reacción de degradación de CBZ con ZnO es el que aparece en las Figuras 12 – 14.

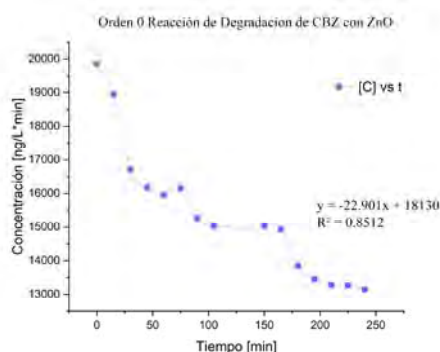


FIGURA 12. Análisis cinético de orden 0 de la reacción de degradación de CBZ con el nanocatalizador de ZnO muestra 3 con 0.4 ml de precursor de H_2O_2 .

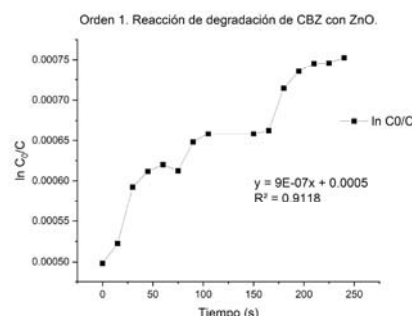


FIGURA 13. Análisis cinético de orden 1 de la reacción de degradación de CBZ con el nanocatalizador de ZnO muestra 3 con 0.4 ml de precursor de H_2O_2 .

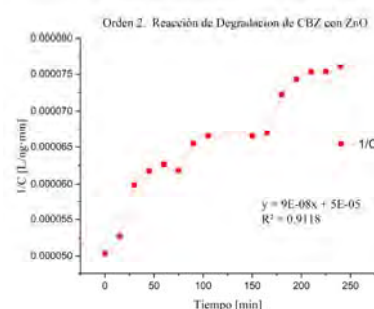


FIGURA 14. Análisis cinético de orden 2 de la reacción de degradación de CBZ con el nano catalizador de ZnO muestra 3 con 0.4 ml de precursor de H_2O_2 .

El mejor ajuste se observó para la cinética de **segundo orden** ($R^2 = 0.912$), con una constante de velocidad $k = 9.40 \times 10^{-8} \text{ L ng}^{-1} \text{ min}^{-1}$.

A partir de este modelo, se calcularon parámetros cinéticos relevantes: el tiempo de vida media $t^{1/2}$ fue de 536 min, mientras que los tiempos para alcanzar el 90 % y 99% de degradación fueron de 50,500 min (aproximadamente 35 días) y 505,000 min (aproximadamente 351 días), respectivamente.

4. CONCLUSIONES

Estos resultados indican que el proceso de degradación utilizando nanocatalizadores de ZnO con tamaño de cristalito de 25.7 nm es lento, lo que sugiere que bajo las condiciones experimentales empleadas (pH 8, 2 g/L de catalizador, 0.4 mL de H_2O_2 , 20,000 ng/L de CBZ y 4.1 h de irradiación) se requiere un tiempo prolongado de reacción para lograr una eliminación significativa del contaminante.

El análisis cinético aporta información clave para la optimización de futuras estrategias de tratamiento de la CBZ en aguas residuales o tratadas. Estos resultados sugieren la necesidad de buscar tratamientos más agresivos, así como el uso de catalizadores soportados con un metal para mejorar la eficiencia del proceso.



AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Víctor Lara Corona y al laboratorio de DRX en el departamento de química de la UAM.

Al Dr. Gerardo Chávez Esquivel y al Ing. José de Jesús Sierra Díaz por su apoyo en los FTIR.

REFERENCIAS

- [1]. Dalrymple OK, Yeh D H, and Trotz MA, *Removing pharmaceuticals and endocrine-disrupting compounds from wastewater by photocatalysis*. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 82:121–134 (2007). DOI:[10.1002/jctb.1657](https://doi.org/10.1002/jctb.1657)
- [2]. Dewil R, Mantzavinos D, Poulios I, and Rodrigo MA, *New perspectives for advanced oxidation processes*. Journal of Environmental Management 195:93–99 (2017). DOI:[10.1016/j.jenvman.2017.04.010](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.010).
- [3]. Wilkinson JL, Boxall ABA, Kolpin DW, Leung K MY, Lai RWS, Galban-Malag Cand Teta C, *Pharmaceutical pollution of the world's rivers*. National Academy of Sciences of the United States of America 119 (2022), e2113947119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2113947119>.
- [4]. Bhatti MA, Khan MA, Iqbal M, Shaari A, and Akhtar J, *Efficient photocatalysts based on silver doped ZnO nanorods for the photodegradation of methyl orange*. Ceramics International. 45: 23289–23297 (2019).
- [5]. Cunningham VL, Perino C, D'Aco VJ, Hartmann A, and Bechter R, *Human health risk assessment of carbamazepine in surface waters of North America and Europe*. Regulatory Toxicology and Pharmacology 56: 343–351 (2010). <https://doi.org/10.1016/J.YRTPH.2009.10.006>.
- [6]. Li SW, and Lin AYC, *Increased acute toxicity to fish caused by pharmaceuticals in hospital effluents in a pharmaceutical mixture and after solar irradiation*. Chemosphere 139: 190–196 (2015). <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2015.06.010>.
- [7]. Dalahmeh S, Ahrens L, Gros M, Wiberg K, and Pell M, *Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm*. Science of The Total Environment 612: 192–201 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.08.178>.
- [8]. Das S, Ray NM, Wan J, Khan A, Chakraborty T, and Ray MB, *Micropollutants in Wastewater: Fate and Removal Processes*. Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource 75-107 (2017) <https://doi.org/10.5772/65644>.
- [9]. Lester Y, Mamane H, Zucker I, and Avisar D, *Treating wastewater from a pharmaceutical formulation facility by biological process and ozone*. Water Research 47: 4349–4356 (2013). <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2013.04.059>.
- [10]. Dwivedi K, Morone A, Chakrabarti T, and Pandey R A, *Evaluation and optimization of Fenton pretreatment integrated with granulated activated carbon (GAC) filtration for carbamazepine removal from complex wastewater of pharmaceutical industry*. Journal of Environmental Chemical Engineering 6: 3681–3689 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2016.12.054>.
- [11]. Calderón A, Meraz M, and Tomasini A, *Pharmaceuticals Present in Urban and Hospital Wastewaters in Mexico City*. Journal of Water Chemistry and Technology 41:105–112 (2019). <https://doi.org/10.3103/S1063455X19020073>.
- [12]. Mir-Tutusa JA, Jaén-Gil A, Barceló D, Buttiglieri G, Gonzalez-Olmos R, Rodríguez-Mozaz S, Caminal G, and Sarra M, *Prospects on coupling UV/H₂O₂ with activated sludge or a fungal treatment for the removal of pharmaceutically active compounds in real hospital wastewater*. Science of The Total Environment 773: 145374 (2021a). <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.145374>.
- [13]. Fu Q, Malchi T, Carter LJ, Li H, Gan J, and Chefetz B, *Pharmaceutical and personal care products: From wastewater treatment into agro-food systems*. Environmental Science & Technology 53: 14083–14090 (2019).
- [14]. Versteegen E, Häkkinen M, Wu D, Heikamp-de Jong I, Roessink I, Peeters E T H M, and van den Brink P J, *Effects of the drug carbamazepine on the structure and functioning of a freshwater aquatic ecosystem*. Ecotoxicology and Environmental Safety 294: 118009 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.118009>.
- [15]. Molnarova L, Halesova T, Vaclavikova M, and Bosakova Z, *Monitoring pharmaceuticals and personal care products in drinking water samples by the LC-MS/MS method to estimate their potential health risk*. Molecules 28: 5899 (2023). <https://doi.org/10.3390/molecules28155899>.
- [16]. Thilak KR and Umamaheswari S, *FTIR, FTR and UV-Vis Analysis of Carbamazepine*. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences 2:685-693 (2011).





Aplicación sustentable en la degradación de contaminantes emergentes: fotocátalisis de nanotubos de TiO_2

B. ARCE-CORTES¹, G.E. ZAMORA-RODEA¹, R. ROSAS-CEDILLO², A.K. MEDINA-MENDOZA¹, J.A. COLIN-LUNA³

¹ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, departamento de Ciencias Básicas, Av San Pablo Xalpa 180, San Martín Xochinahuac, Azcapotzalco, 02128 Ciudad de México, CDMX.

² Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Av Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1 A Sección, Iztapalapa, C.P. 09310, CDMX

³ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, departamento de Energía, Av San Pablo Xalpa 180, San Martín Xochinahuac, Azcapotzalco, 02128 Ciudad de México, CDMX.

Autor de Correspondencia: A.K. Medina-Mendoza (e-mail: amedina@azc.uam.mx)

RESUMEN La presencia de contaminantes emergentes farmacéuticos en cuerpos de agua representa un desafío ambiental debido a su persistencia, baja biodegradabilidad y potencial toxicidad. En este trabajo se evaluó la actividad fotocatalítica de nanotubos de TiO_2 (NT- TiO_2) modificados con hierro y cobre (1 y 2 % en peso) en la degradación de paracetamol, ácido salicílico y diclofenaco bajo irradiación UV y UV-Vis. Los materiales fueron sintetizados mediante impregnación mecánica en seco y caracterizados por difracción de rayos X y fisisorción de N_2 . La evaluación fotocatalítica se realizó en un reactor batch de cuarzo, monitoreando la degradación por espectroscopía UV-Vis.

Los resultados muestran que el catalizador 1 % Fe/NT- TiO_2 presenta la mayor eficiencia, alcanzando hasta 64 % de degradación de ácido salicílico, mientras que cargas metálicas superiores provocan una disminución de la actividad. Este comportamiento se atribuye a una mejor separación de cargas y a la participación del hierro en procesos redox superficiales. Los hallazgos confirman que la modificación de NT- TiO_2 con bajas cargas de Fe constituye una estrategia eficaz y sustentable para el tratamiento avanzado de aguas.

PALABRAS CLAVE: hierro, TiO_2 , contaminantes emergentes, fotodegradación.

1. INTRODUCCION

La detección creciente de contaminantes emergentes, particularmente fármacos antiinflamatorios y analgésicos, en aguas residuales y cuerpos receptores ha generado una preocupación ambiental significativa. Compuestos como el paracetamol, el ácido salicílico y el diclofenaco son ampliamente consumidos y presentan una elevada estabilidad química, lo que limita su eliminación mediante tratamientos convencionales y favorece su persistencia en el ambiente.

En este contexto, los procesos de oxidación avanzada (POA), y en particular la fotocátalisis heterogénea, han demostrado ser alternativas eficientes para la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes. El TiO_2 es uno de los semiconductores más estudiados debido a su estabilidad, bajo costo y nula toxicidad; sin embargo, su eficiencia se ve limitada por la rápida recombinación electrón-hueco y su activación predominante bajo radiación UV.

Estrategias como la modificación con metales de transición y el uso de estructuras nanotubulares han mostrado mejorar la separación de cargas y la generación de especies reactivas. Por lo que el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la incorporación de Fe y Cu sobre NT- TiO_2 , analizar su desempeño fotocatalítico y su selectividad hacia distintos fármacos.



2. METODOLOGÍA

2.1. Síntesis de nanotubos de TiO_2

Los nanotubos de dióxido de titanio se sintetizaron mediante un método hidrotérmico, empleando un precursor nanoparticulado de TiO_2 en fase anatasa disperso en una solución concentrada de hidróxido de sodio. La suspensión se sometió a tratamiento hidrotérmico en una autoclave de acero inoxidable bajo presión autógena durante 18 h. Posteriormente, el sólido obtenido fue lavado con agua bidestilada y sometido a un proceso de intercambio iónico con ácido clorhídrico hasta alcanzar un pH entre 2.5 y 3. Finalmente, el material fue calcinado a temperaturas de 400°C , obteniéndose los nanotubos de TiO_2 (NT- TiO_2).

2.2. Síntesis de los fotocatalizadores metálicos

Los fotocatalizadores Fe/NT- TiO_2 , y Cu/NT- TiO_2 se prepararon mediante impregnación mecánica en seco, utilizando acetilacetonatos metálicos como precursores. El contenido metálico se ajustó a 1 y 2 % en peso, mezclando los precursores con los nanotubos de TiO_2 mediante molienda manual hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, las muestras se secaron a 100°C durante 24 h y se calcinaron a 400°C bajo flujo de aire.

2.3. Evaluación catalítica

La actividad fotocatalítica se evaluó en un reactor batch de cuarzo con capacidad de 1 L, operado bajo luz visible y a una temperatura constante de 22°C . Se emplearon soluciones acuosas de paracetamol, ácido salicílico y diclofenaco con una concentración de catalizador de 0.167 g/L. Previo a la irradiación (UV-Vis o UV), las suspensiones se mantuvieron en oscuridad para permitir la adsorción del fármaco sobre la superficie del catalizador. Durante la reacción se tomaron alícuotas a $t = 0, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180$ y 240 minutos. Las muestras previamente fueron filtradas y después analizadas por un espectrofotómetro Lambda 35 de Perkin Elmer, para determinar la concentración residual del contaminante.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de DRX se muestran en la figura 1, De acuerdo con los datos reportados en la carta JCPDS, las reflexiones apreciables en 25.31° , 37.88° , 48.03° y 53.99° corresponden a los planos (101), (004), (200) y (105), respectivamente, que son característicos de la fase anatasa. De acuerdo con los difractogramas, se observa que los

fotocatalizadores mantienen la fase anatasa del TiO_2 y que los metales incorporados (Fe y Cu) están altamente dispersos, lo que favorece la formación de heterouniones capaces de mejorar la separación de cargas.

De los análisis de fisisorción de nitrógeno del soporte se obtuvo un área BET de $210 \text{ m}^2/\text{g}$, volumen de poro de $0.57 \text{ cm}^3/\text{g}$ y un diámetro de poro de 10.9 nm. Las propiedades texturales de los fotocatalizadores disminuyeron aprox. 15 % con respecto al soporte. También se mantuvo la isoterma de absorción y desorción del soporte cuando se incorporaron los metales.

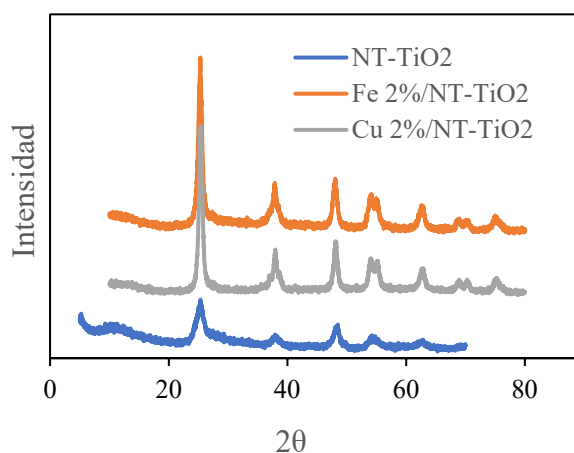


FIGURA 1. Patrones de difracción de rayos X del soporte y de los fotocatalizadores al 2% en peso de hierro y cobre.

Los resultados de evaluación catalítica mostraron que la degradación de los fármacos usando fotocatalizadores en presencia de luz UV-Vis fue considerablemente mayor a los evaluados sin luz UV-Vis. En la figura 2, se muestran los resultados de evaluación catalítica en presencia de luz UV. Se observa principalmente que el contenido de metal y el tipo de metal incorporado en los NT- TiO_2 , así como la interacción entre el catalizador y cada contaminante, afectan la actividad catalítica. A bajas cargas metálicas (1 %), el Fe y, en menor medida, el Cu favorece la separación de los pares electrón-hueco, reduciendo la recombinación y promoviendo la formación de especies reactivas ($\bullet\text{OH}$ y $\text{O}_2\bullet^-$), lo que incrementa la eficiencia fotocatalítica, debido a que el Fe suele unirse con TiO_2 favoreciendo la transferencia de electrones y, en presencia de agua/oxígeno, puede promover la formación de radicales; además, puede participar en ciclos tipo $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ que facilitan procesos oxidativos (dependiendo del estado



químico y dispersión). El Cu puede comportarse de manera más ambivalente: en ciertos estados (CuO , Cu_2O , Cu^0) puede ayudar, pero también puede introducir recombinación o no favorecer tanto la ruta que domina bajo UV (especialmente si la forma química y la interfaz con TiO_2 no son las óptimas).

En contraste, al aumentar la carga a 2 %, el exceso de metal puede generar centros de recombinación, provocar aglomeración de la superficie activa y bloquear sitios catalíticos, ocasionando una disminución en la degradación. El Fe muestra un mejor desempeño que el Cu debido a su mayor capacidad para facilitar la transferencia de carga y participar en procesos redox superficiales que favorecen reacciones oxidativas bajo irradiación UV. Esto explica que el 1 % Fe/NT- TiO_2 sea el catalizador más eficiente. Por su parte, el Cu presenta una actividad más moderada, probablemente asociada a una menor eficiencia en la separación de cargas o a estados superficiales menos favorables. Finalmente, la selectividad hacia los contaminantes está relacionada con su estructura molecular y afinidad de adsorción sobre el catalizador. El ácido salicílico presenta la mayor degradación, posiblemente por una interacción más fuerte con la superficie del catalizador y una mayor susceptibilidad a la oxidación por radicales hidroxilo. El paracetamol muestra una degradación intermedia, mientras que el diclofenaco, debido a su estructura más compleja, resulta más resistente a la fotodegradación bajo las condiciones evaluadas.

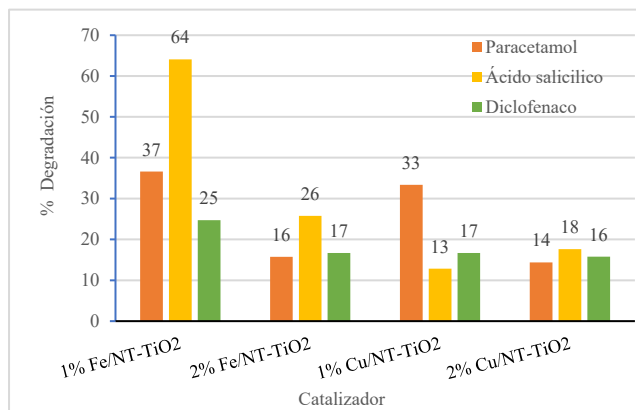


FIGURA 2. Evaluación catalítica de los fotocatalizadores al 1y 2% en peso de hierro y cobre en presencia de luz UV.

La selectividad observada en la degradación de los contaminantes se atribuye a diferencias en su estructura molecular y en su afinidad de adsorción sobre la superficie del fotocatalizador. El ácido salicílico presenta una mayor

susceptibilidad a la oxidación debido a la presencia de grupos funcionales fenólicos y carboxílicos, los cuales favorecen su adsorción en los sitios activos del TiO_2 y su interacción con especies férricas superficiales. Esta interacción facilita procesos redox tipo $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, promoviendo la generación de radicales hidroxilo altamente reactivos y acelerando su degradación. En contraste, el diclofenaco, cuya estructura molecular es más compleja y contiene sustituyentes clorados que desactivan el anillo aromático, muestra una menor afinidad por la superficie del catalizador y una mayor resistencia al ataque oxidativo, resultando en menores eficiencias de degradación bajo las mismas condiciones experimentales.

El ajuste de los datos experimentales a modelos cinéticos indicó que la degradación de los fármacos sigue un comportamiento de pseudo-primer orden, lo que concuerda con reportes de la literatura para sistemas fotocatalíticos heterogéneos. Estos resultados confirman que la incorporación de metales de transición en nanotubos de TiO_2 constituye una estrategia eficaz para mejorar el desempeño fotocatalítico.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó la aplicación de fotocatalizadores de Fe y Cu soportados en nanotubos de TiO_2 para la degradación de contaminantes emergentes en soluciones acuosas. Los resultados demostraron que los catalizadores 1%Fe/NT- TiO_2 presentan la mayor actividad fotocatalítica, logrando elevadas eficiencias de degradación para ácido salicílico y 1% Cu/NT- TiO_2 para paracetamol. La combinación de estructuras nanotubulares con metales de transición favorece la separación de cargas fotogeneradas y la generación de especies oxidantes, mejorando significativamente el proceso. Estos hallazgos respaldan el uso de estos materiales como alternativas sustentables, económicas y escalables para el tratamiento avanzado de aguas residuales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Deyanira Angeles Beltrán por su apoyo en la realización del análisis de difracción de rayos X.





REFERENCIAS

- [1]. Fujishima A, Zhang X and Tryk D A, TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports* 63:515–582 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001>.
- [2]. Herrmann J M, Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today* 53:115–129 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00107-8).
- [3]. Hoffmann M R, Martin S T, Choi W and Bahnemann D W, Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Reviews* 95:69–96 (1995). <https://doi.org/10.1021/cr00033a004>.
- [4]. Chong M N, Jin B, Chow C W K and Saint C, Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. *Water Research* 44:2997–3027 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>.
- [5]. Malato S, Fernández-Ibáñez P, Maldonado M I, Blanco J and Gernjak W, Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. *Catalysis Today* 147:1–59 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018>.





Esquemas de protección para subestaciones de rectificación para trolebuses

FERNANDO TOLEDO TOLEDO¹, CRUZ DÍAZ CASTAÑEDA², SALVADOR BRIONES REYES³

¹Universidad Autónoma Metropolitana-Azc, Profesor investigador, ftoledo2@azc.uam.mx

²Agencia Reguladora de Transporte Ferroviario, Director de Construcción, cruz.diaz@sict.gob.mx

³STE-CDMX, Subgerente de mantenimiento a instalaciones eléctricas, sbrionesr@ste.cdmx.gob.mx

Autor de Correspondencia: Fernando Toledo Toledo (e-mail: ftoledo2@azc.uam.mx).

ABSTRACT La red de trolebuses de la CDMX representa hoy en día, uno de los pilares de la denominada *Movilidad Integrada* de la ciudad. Con alrededor de 425 unidades de alta tecnología, presta servicio con 12 líneas a zonas estratégicas de la ciudad. Cada una de estas líneas cuenta individualmente con un número de estaciones de rectificación que convierten la energía eléctrica de la red de distribución de 23 kV de corriente alterna a 600V de corriente directa para alimentar a los trolebuses, estableciendo un sistema complejo el que debe funcionar con parámetros de calidad de suministro a nivel excelencia. La característica de estos sistemas multivoltaje con CA y CD, implica aspectos de particular importancia, dado que se debe garantizar la continuidad del servicio ante la presencia de fallas. El esquema de protección cuenta con dispositivos que en conjunto deben garantizar la selectividad y continuidad del servicio; en un sistema que es particularmente sensible a la presencia de fallas debido a que el sistema de alimentación (catenaria) a las unidades es aérea y transita a lo largo de zonas muy habitadas y en algunos casos con mucha vegetación. Se presenta una descripción del modelo general del esquema de protecciones de subestaciones de rectificación (SER) y un algoritmo computacional para la coordinación de protecciones de sobrecorriente.

INDEX TERMS Distribution systems, protection analysis, overcurrent coordination, AC/DC traction distribution systems.

1. INTRODUCCIÓN

El Sistema de Trolebuses se remonta al año de 1951, como una alternativa al uso de tranvías siendo más silencioso y con mayor rango de movilidad. En 1947 se crea el Servicio de Transportes Eléctricos (STE) para administrar el servicio de tranvías y posteriormente incorporar a los trolebuses. La primera línea, inaugurada el 9 de marzo de 1951, conectaba el centro de la ciudad (Tacuba) con la Calzada de Tlalpan, utilizando unidades importadas modelo *Westram*. Por los años 80 se fabricaron trolebuses en México (MASA), mismos que hoy en día siguen operando y representan hoy en día, un ícono de esa época. La falta de inversión disminuyó la flota y las líneas existentes por lo que se pensó que el servicio de trolebuses, tan popular y

económico, pronto desaparecería. Sin embargo, en el año de 2019 se implementó un programa de renovación del sistema con unidades de origen chino (*Yutong*) que ya cuentan con bancos de baterías que disminuyen significativamente el problema de la intermitencia del servicio por problemas de la red eléctrica. Al día de hoy el trolebús, parte del Sistema de Movilidad Integral de la Ciudad, sigue siendo un símbolo del transporte eléctrico de la ciudad.

2. SUBESTACIONES DE RECTIFICACIÓN

Las unidades de tracción son alimentadas a través de una línea aérea de corriente directa (polo positivo y polo negativo) con una tensión de 600V_{CD}, a este sistema se le denomina *catenaria*. Las subestaciones que alimentan a la catenaria se denominan *subestaciones de rectificación* (SER) y su número y ficha técnica dependen de la longitud de la línea a alimentar y el número de trolebuses que operan en cada línea. Los trolebuses de última generación (con baterías) presumen autonomías cercanas a los 80km, sin necesidad de conectarse a la catenaria. Para el presente año (2025) se introdujo en la línea 12 que corre desde Taxqueña a Perisur, un concepto nuevo de SER modular montada en un conjunto de contenedores. Esta estructura denominada *intelligent box type DC traction substation*, consiste en tres módulos que contienen: 1) el mecanismo de interrupción en alto voltaje y el equipo de control de la etapa de potencia; 2) módulo de los transformadores de la subestación (TR principal de rectificación y TR de servicios propios) y 3) módulo de equipo de corriente directa, incluyendo los rectificadores, el interruptor de CD y los sistemas de administración de información (figura 1). La figura 2 muestra el DU prototipo, con los números principales de las protecciones encerrados en círculo. Con un sistema de alimentación a 23kV y una salida a 600V_{CD}, las SER modulares, cuenta con un transformador principal de capacidad 2225kVA y un transformador de servicios propios con capacidad de 30kVA.



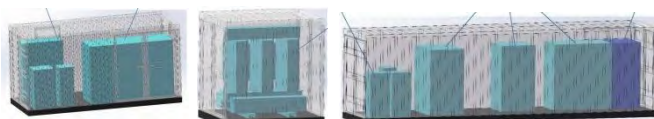


FIGURA 1. Subestación de rectificación tipo modular.

establecidos en la Tabla 1, debiéndose realizar el estudio de protecciones eléctricas.

TABLA 1. Requerimientos de Centros de Carga.

Requerimiento	Centro de Carga conectados en Media Tensión con demanda contratada de $< 1\text{ MW}$	Centro de Carga conectados en Media Tensión con demanda contratada de $\geq 1\text{ MW}$	Centro de Carga conectados en Alta Tensión
2.1 Tensión	Aplica	Aplica	Aplica
2.2 Frecuencia	Aplica	Aplica	Aplica
2.3 Corto circuito	Aplica	Aplica	Aplica
2.4 Factor de potencia	No aplica	Aplica	Aplica
2.5 Protecciones	Aplica	Aplica	Aplica
2.6 Control	Aplica solo para RDC	Aplica solo para RDC	Aplica solo para RDC
2.7 Intercambio de información	Aplica conforme lo señale el manual de TIC	Aplica conforme lo señale el manual de TIC	Aplica conforme lo señale el manual de TIC
2.8 Calidad de la potencia	Aplica solo el desbalance de tensión y corriente	Aplica	Aplica

Este trabajo se enfoca al punto 2.5 cuyo objetivo es el de garantizar que, ante la presencia de una falla, se minimicen conjuntamente los usuarios afectados y el daño al equipo.

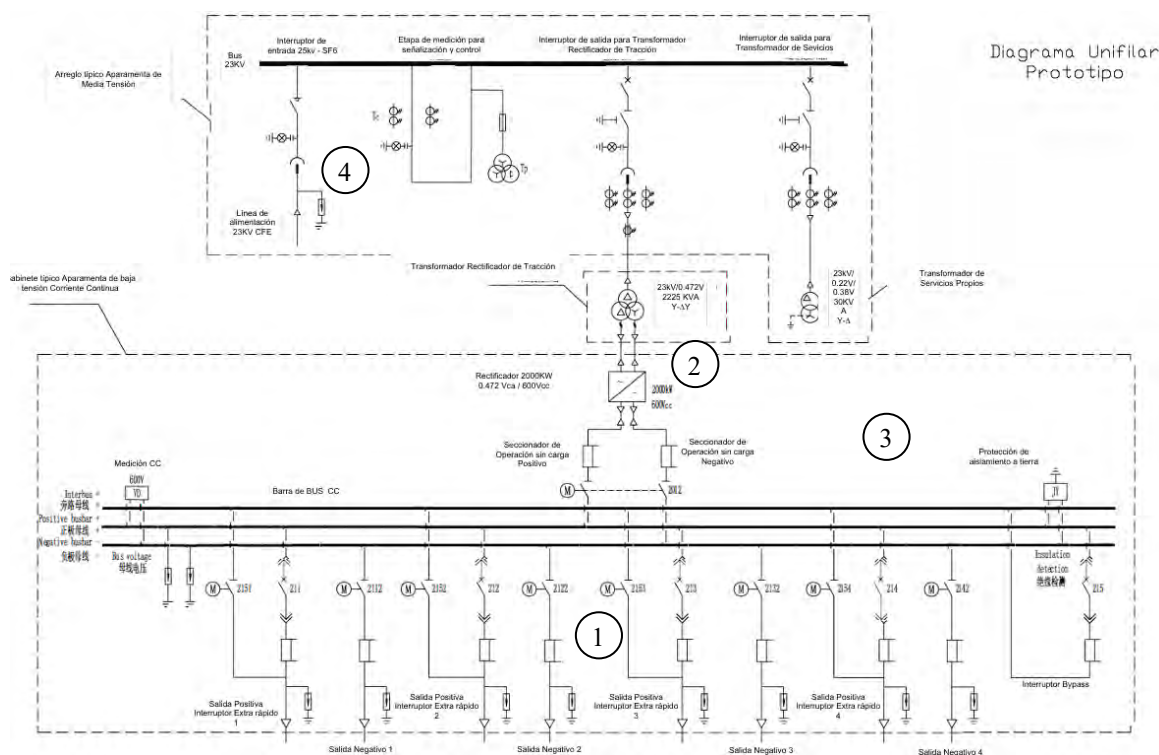


FIGURA 2. Diagrama Unifilar prototipo de la SER.

Cualquier SER del STE se clasifica como un centro de carga en MT con capacidad $\geq 1\text{ MW}$, por lo que de conformidad al Código de Red 2, debe cumplir con los requerimientos

3. RUTAS DE COORDINACIÓN

Para la protección adecuada de cada uno de los equipos que conforman el sistema (acometidas, conductores,

transformadores, equipo de utilización) es necesario calcular y graficar las características de operación normal y los límites de protección de cada equipo.

El estándar de representación gráfica, lo representa la hoja normalizada *log-log* de $4\frac{1}{2} \times 5$. Estas características determinan fronteras (a la derecha la operación normal y a la izquierda los límites de protección) dentro de las cuales deberá quedar la gráfica de la o las protecciones asociadas al equipo (figura 3). De esta manera se garantiza que durante la operación normal del equipo a proteger, las protecciones asociadas no actúen y en contraposición, para cualquier condición anómala, las protecciones operen antes que el equipo empiece a dañarse.



FIGURA 3. Zonificación de la hoja de coordinación.

Previo a la selección y ajuste de los dispositivos de protección, es necesario definir uno ó más caminos desde el punto más remoto de utilización (barras en baja tensión), hasta el más cercano al suministro de energía (buses de generación y/o acometidas). Para determinar una ó más *rutas de coordinación* (figura 4), es necesario considerar los siguientes aspectos:

- De manera general, la protección ajustada más alto corresponde al equipo de mayor capacidad del bus bajo análisis, de esta manera para cada bus se toma como representativo el equipo de mayor capacidad, siendo excepciones cuando se tienen equipos distintos (p.e. motor y transformador) de capacidad similar, en cuyo caso se toman **los dos elementos** como representativos del bus.
- Para efectos de coordinación, únicamente se toman como referencia las protecciones ubicadas en serie.
- El avance de la ruta corresponderá siempre desde el equipo de menor hacia el de mayor capacidad.

3. ESTUDIO DE COORDINACIÓN

Para la realización del estudio de protecciones, es necesario contar al menos con la siguiente información:

- Características de operación y límites de protección de cada equipo a proteger.

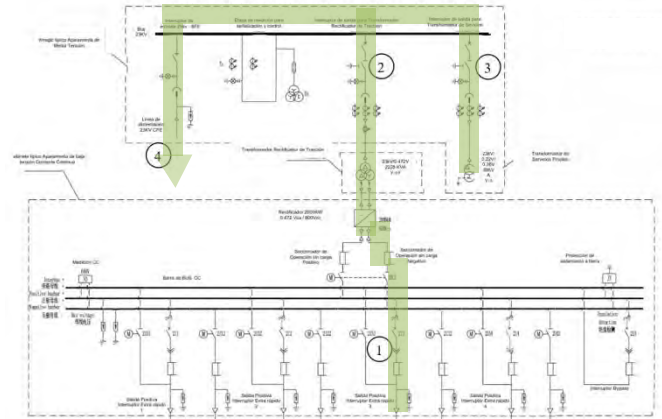


FIGURA 4. Ruta de coordinación.

- Estudio de cortocircuito trifásico y de línea a tierra. Se recomienda utilizar el procedimiento descrito en IEEE 141 (*red book*).
- Características y curvas I-t del fabricante, para todos los equipos de protección empleados.

LÍMITES DE OPERACIÓN Y PROTECCIÓN

El componente principal de la SER es el TR de 2225kVA el cual reduce la tensión de 23kV a 472V para alimentar al rectificador, cuya potencia es de 2000kW, a una tensión nominal de salida de 600V. Bajo estas condiciones la corriente nominal del rectificador ($I_{P_{rect}}$) es de:

$$I_{P_{rect}} = 2000kW / 600V = 3333.33A$$

Esta corriente se reparte en cada una de las 4 salidas hacia el circuito de catenaria, correspondiendo una corriente para cada rama de: $3333.33A / 4.0 = 833.3325A$

Esta corriente es la que verá cada relevador asociado a cada alimentador, protegiéndolo contra sobrecarga y cortocircuito, el arreglo de conductores corresponde a: Cu 500kCM-4CF.

Dispositivo 1. Relevador térmico de sobrecarga, modelo ST700, la ecuación de respuesta se expresa en la ecuación 1.



$$t = Tth * \ln \frac{[I/Ith]^2}{[I/Ith]^2 - Kact}$$

In Corriente nominal del derivador (shunt)
 Ith Ajuste de corriente de sobrecarga térmica
 Tth Constante de tiempo para la sobrecarga térmica
 Kact Factor de disparo de sobrecarga térmica
 Krst Factor de restablecimiento de sobrecarga térmica

Ajustes:

In(A) = 3000 Ith(In) = 0.30* Tth(s) = 510
 Kact = 0.83 Krst = 0.46

* Corriente de disparo: (3000)(0.30) = 900A → %SC = 8.0%

La figura 5 muestra la característica de respuesta numérica y en hoja *semi-log* proporcionada por el fabricante.

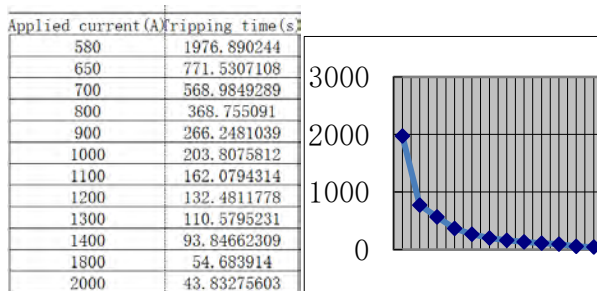


FIGURA 5. Característica de respuesta del relé ST700.

La figura 6, muestra la curva del relevador y los alimentadores a catenaria en hoja normalizada *log-log* en $A_{@600VCD}$. La simulación computacional se realizó mediante el paquete COORFT2 desarrollado en el lenguaje Visual Fortran, en la plataforma Microsoft Visual Studio 2017. El programa cumple con los lineamientos de las recomendaciones IEEE Std 493™, IEEE Std 141 y IEEE Std 242-2001, referentes al modelado de elementos de protección y representación de características de operación y límites de protección.

Puede observarse que el dispositivo, en la zona de tiempo inverso, presenta tiempos de operación extremadamente altos, lo que dificulta la coordinación con los dispositivos que se encuentran en la parte superior de la ruta. Por esta razón el ajuste de la protección instantánea para este relevador, se realiza desde valores inmediatos superiores a la corriente a plena carga del transformador de rectificación ($55_{@23kV} = 2108_{@0.6kV}$).

1 Dispositivo 2.

El dispositivo2 protege al transformador de rectificación por lo que es necesario determinar previamente las características de operación normal y los límites de protección del equipo.

Potencia nominal 2225kVA

Corriente a plena carga: $I_{pc} = \frac{2225kVA}{\sqrt{3} 23kV} = 55.85A_{@23kV}$

Impedancia nominal $z = 7.64\%$

Conexión: $\Delta-\Delta-Y(YNy0dd11)$

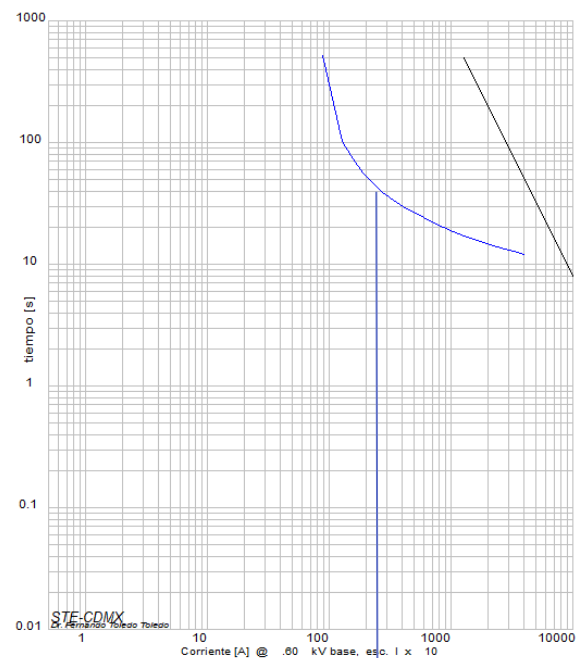


FIGURA 6. Relé ST700, salidas a catenaria.

Corriente de magnetización (inrush). La tabla 2 muestra los multiplicadores de I_{pc} para transformadores sumergidos en líquido aislante. Para transformadores tipo seco se considera un factor multiplicativo de 16

TABLA 2. Multiplicativos para la corriente de magnetización.

POTENCIA (kVAs)	FACTOR INRUSH
kVAs < 1500	8.0
1500 ≤ kVAs ≤ 3750	10.0
kVAs > 3750	12.0

$I_{INRUSH} = 16.0 I_{pc} = 893.6A_{@23kV}$

Máximos ajustes NEC. El National Electric Code (NEC) lista los límites máximos requeridos para la protección de sobrecorriente del primario y secundario de transformadores, la Tabla 3 resume estos límites en porciento de la corriente nominal del transformador.





Dado que el rectificador que es alimentado por el transformador, cuenta con protección individual para los diodos, se considera que el TR *no* cuenta con protección del lado secundario por lo que el máximo ajuste de la protección contra sobrecorriente del lado primario (NEC_p) corresponde a $3I_{pc} = 167.55A @ 23kV$

Curva ANSI de máxima corriente circulante de falla. Representa gráficamente la capacidad que tiene el TR de soportar sin deteriorarse, corrientes circulantes debidas a la presencia de fallas en el lado secundario.

El primer paso es la determinación de la categoría del transformador, mostrada en la tabla 4. La figura 6 muestra combinadamente el tipo de curva y las ecuaciones de cálculo de los puntos correspondientes.

TABLA 3. Ajustes máximos NEC para transformadores.

Z _{TRANSFORM} (Z%)	VOLTAJE (V)	PRIMARIO		SECUNDARIO		
		AJUSTE INTERRUPTOR (%)	CAPACIDAD FUSIBLE (%)	ARRIBA DE 600 V		600 V ó MENOS
				AJUSTE INTERRUPTOR (%)	CAPACIDAD FUSIBLE (%)	
TODAS	ARRIBA DE 600 V	300	250	NINGUNA	NINGUNA	NINGUNA
Z% ≤ 6		600	300	300	250	125
6 ≤ Z% ≤ 10		400	300	300	250	125
TODAS	600 V ó MENOS	125	125	...	...	NINGUNA
Z% ≤ 6		250	250	...	...	125
6 ≤ Z% ≤ 10		600	600	...	...	PROT. TÉR. DE SOBRECARGA COORDINADA
		400	400	...	...	

TABLA 4. Categoría ANSI para transformadores.

CATEGORÍA	CAPACIDAD EN kVAs	
	1 FASE	3 FASES
I	5 – 500	15 – 500
II	501 - 1667	501 – 5000
III	1668 - 10000	5001 – 30000
IV	Arriba de 10000	arriba de 30000

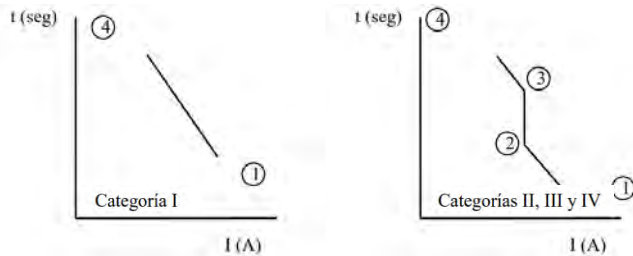


FIGURA 7. Curva ANSI para transformadores.

TABLA 5. Puntos para la curva ANSI.

PUNTO	CATEGORÍA	TIEMPO (s)	CORRIENTE (A) *
1	I	$1250 \times Z_T^{-2}$	I_{pc}/Z_T
	II	2	I_{pc}/Z_T
	III Y IV	2	$I_{pc}/(Z_T + Z_S)$
2	II	4.08	$0.7 \times I_{pc}/Z_T$
	III Y IV	8.0	$0.5 \times I_{pc}/(Z_T + Z_S)$
3	II	$2551 \times Z_T^{-2}$	$0.7 \times I_{pc}/Z_T$
	III Y IV	$5000 \times (Z_T + Z_S)^{-2}$	$0.5 \times I_{pc}/(Z_T + Z_S)$
4	I, II, III Y IV	50	$5 \times I_{pc}$

Debido a la ausencia de protección principal secundaria y que se cuenta con cortacircuitos-fusible en la acometida, es conveniente graficar los puntos *inrush* para fusibles, para impedir que, durante re-conexiones de la acometida, se puedan fundir o degradar los fusibles. La tabla 6, muestra (IEEE 242), los valores de estos puntos.

TABLA 6. Puntos inrush para fusibles.

Punto	Multiplicativo de corriente/corriente [A]	Tiempo (s)
1	$14I_{pc} = 781.93$	0.10
2	$28I_{pc} = 1563.87$	0.01
3	$6I_{pc} = 335.1$	1.00
4	$3I_{pc} = 167.56$	10.0
5	$2I_{pc} = 111.70$	900.0

La figura 8 muestra combinadamente las características de operación y límites de protección del transformador de 2225kVA.

El relevador utilizado para la protección del lado primario es el NR-PCS-9611S, multifunción, números ANSI 49, 50 y 51. Con modelos de caracterización IEC, IEEE, IMDT, entre otros. Se elige modelo IEC por tener mayor concordancia con los relevadores (CD) de los alimentadores a catenaria.

Por las necesidades de libramiento del punto inrush y cobertura de la curva ANSI, se recomienda el empleo de características de respuesta I-t muy inversa o extremadamente inversa. Para efectos de continuidad de servicio, se parte de una característica IEC-VI.

El ajuste del disparo instantáneo se realiza tomando en cuenta los dos puntos inrush a 0.1s, considerando re-energización rápida SIN tomar en cuenta el valor del punto a 0.01s que no lo libra el ajuste del 50. La razón es que si se utiliza un valor superior a este punto existe una zona de no coordinación en la que el fusible puede operar antes que el relevador (figura 9).



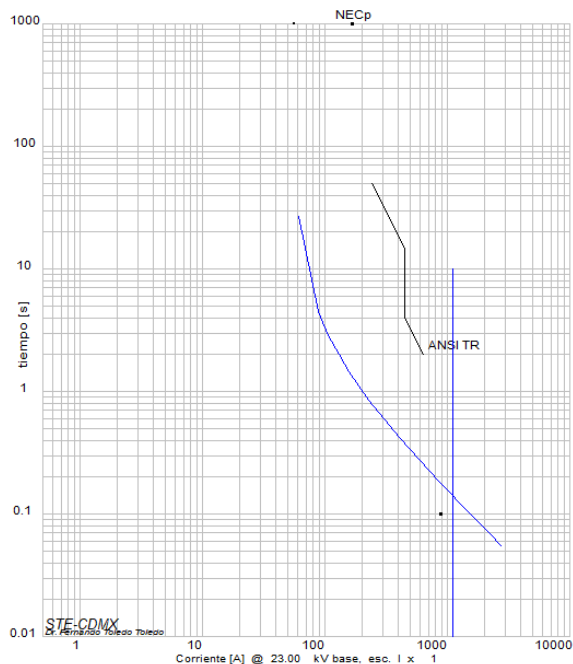


FIGURA 8. Transformador de rectificación 2225kVA.

RTC = 100:1

Rango de ajuste 50/51 = [0.05 – 200] (A); paso: 0.001

Tiempo de retardo 0-100 (s); paso: 0.001

Ajustes (51): Tiempo inverso (TAP): $I_{51} = 0.55$

Amperes primarios = 60.5A@23kV

Instantáneo (50): 11.0A_{sec}; 1100A@23kV

Dispositivo 3. Para este caso, dado que el transformador es de muy pequeña potencia nominal (30kVA) y que se emplea el mismo tipo de relevador (NR-PCS-9611S), su solución se incluye en la última hoja. Los ajustes corresponden a:

$I_{pc} = 0.753A_{@23kV}$ RTC = 50/1

Ajustes (51): Tiempo inverso (TAP): $I_{51} = 0.05$

Amperes primarios = 2.75A@23kV

Instantáneo (50): 0.30A_{sec}; 15.0A@23kV

Dispositivo 4. El dispositivo corresponde a la protección primaria del cable de acometida y de respaldo al relevador dispositivo 2. Se recomienda que la curva quede a la derecha de este relevador procurando en medida de lo posible cubra la curva ANSI para el TR de 2225kVA. Se sugiere un fusible de la marca S&C con una corriente nominal de 80A, la figura 9 muestra este dispositivo en donde se han incluido los puntos inrush para fusibles.

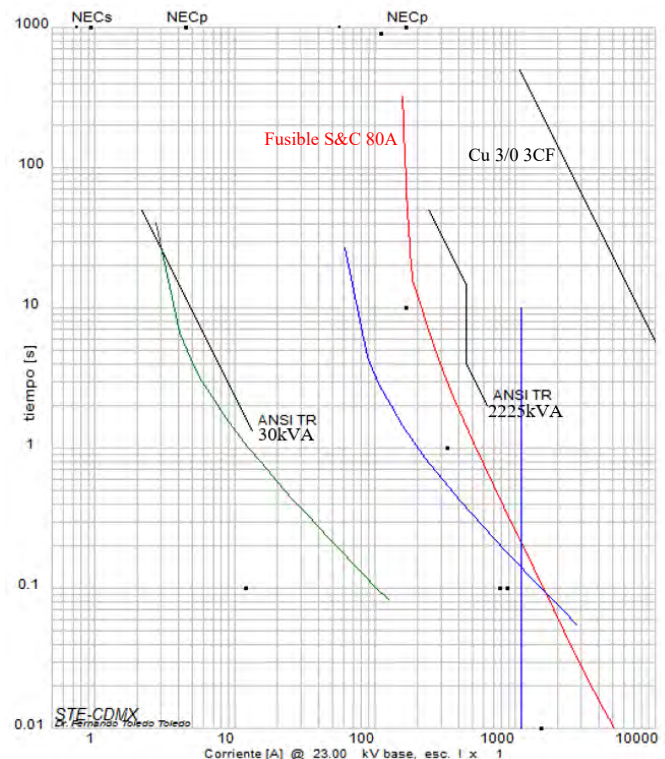


FIGURA 9. Transformadores de 30 y 2225kVA.

Finalmente, la figura 10 muestra la integración de todas las protecciones de la SER analizada. De izquierda a derecha:

- Transformador de 30kVA servicios propios con relevador NR-PCS-9611S (3 color verde).
- Relevador térmico de sobrecarga, salidas a catenaria, modelo ST700 (1 color café).
- Transformador de rectificación 2225kVA con relevador de sobrecorriente lado primario, NR-PCS-9611S (2 color azul).
- Fusible limitador de corriente, marca S&C, corriente nominal 80A (4 color rojo).
- Curva de daño, conductor de acometida: Cobre, calibre 3/0, 3 conductores por fase.

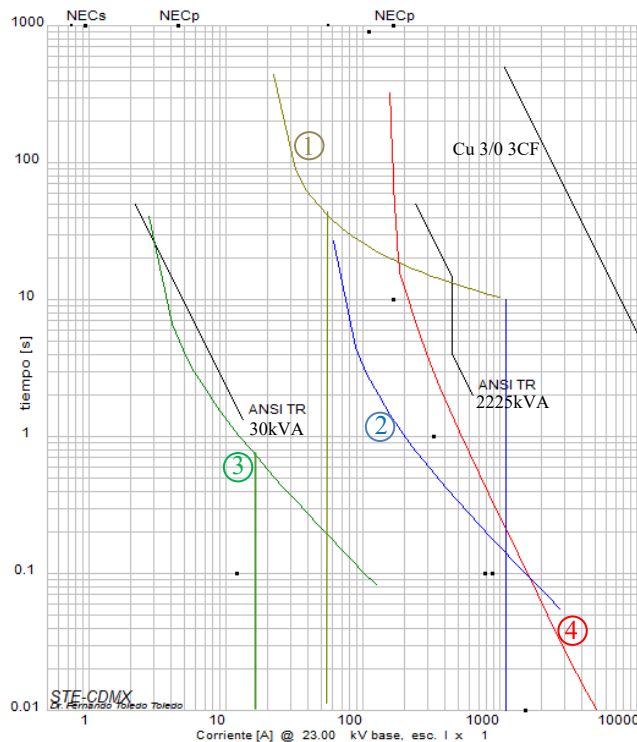


FIGURA 10. Hoja final del sistema.

4. CONCLUSIONES

- La electromovilidad en CDMX ha tenido buenos resultados con la inclusión del sistema de trolebuses como una alternativa viable técnica y económica. Es necesario esperar al menos otros 3 años en virtud de que no han sido alcanzados los periodos mínimos de garantía de los equipos.
- El trolebús moderno tiene la ventaja de poseer independencia energética en alrededor de 90 km. Las baterías ofrecen esta ventaja, aunque representan simultáneamente el talón de Aquiles de la tecnología. La utilización de SER modulares en el sistema probará su eficiencia cuando, en breve, entren en servicio, sometiéndose a ciclos de carga severos típicos de ciudades con gran población.
- En el aspecto de la protección y coordinación, es importante preservar prioritariamente el concepto de continuidad del servicio. Sin embargo, la coexistencia de CA y CD, aunada al empleo de baterías en las unidades de tracción, disminuye las exigencias al sistema de suministro energético a la catenaria.

- El hecho de utilizar un ajuste con constante de tiempo muy alta para el dispositivo 1, se debe a que la única información que suministró el proveedor consiste en la ecuación y la tabulación mostrada en la figura 5. Con el manual específico del relevador es posible mejorar las condiciones de protección.
- El paquete de simulación de coordinación de protecciones (COORFT2), en su versión educativa, puede obtenerse gratuitamente a las direcciones electrónicas de los autores.

REFERENCIAS

- [1] Brown, Homer E. *Solution of large networks by matrix methods*. Wiley Interscience Publication, 1975. ISBN 0-471-11045-0.
- [2] Resolución núm. RES/550/2021 de la Comisión Reguladora de Energía por las que se expiden las disposiciones administrativas de carácter general que contienen los Criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: CÓDIGO DE RED.
- [3] Stagg, Glenn W., El-Abiad, Ahmed H., *Computer Methods in Power System Analysis*. McGraw Hill, 1968. ISBN 0-07-Y85764-4.
- [4] Valores de Corto Circuito de las Redes Generales de Distribución 2026. Dirección de CFE – Distribución. Gerencia de Planeación 2024.
- [5] IEEE Std 141-1993. *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*. ISBN 1-55937-333-4.
- [6] IEEE Std 242-2001. *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*. ISBN 0-7381-2844-9.
- [7] Elgerd, Olle I. *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*. McGraw-Hill, New York, 1985.

AUTORES

Fernando Toledo Toledo. Ingeniero Industrial en Electricidad (ITRO). Realizó estudios de maestría y doctorado (Ing. Eléctrica) en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-IPN. Desde 1981, es profesor investigador de la UAM-A donde coordina proyectos de prestación de servicios al sector público y privado. Produce software didáctico y comercial para el análisis de sistemas eléctricos de potencia. ftoledo2@azc.uam.mx

Cruz Díaz Castañeda. Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones (UNITEC). Se ha desarrollado en la industria pública y privada como responsable técnico en los procesos de implementación y conservación de sistemas de electromovilidad en la CDMX, donde destacan: líneas de trolebús, tren ligero y cablebús. Actualmente Director de





Toledo Toledo F. *et al.*

Construcción en la Agencia Reguladora de Transporte
Ferroviario. cruz.diaz@sict.gob.mx

Salvador Briones Reyes. Ingeniero Electricista por la UAM-A en área de concentración de Sistemas Eléctricos de Potencia. Desde 2016 ha participado en el diseño, cálculo e implementación de instalaciones de distribución eléctrica en corriente alterna y directa (Para sistemas de tracción, subestaciones y catenaria en el servicio de transportes eléctricos de la Ciudad de México). sbrionesr@ste.cdmx.gob.mx





Hidrotratamiento de eugenol a bioturbosina mediante catalizadores de Ni–Pt/SBA-(Zr ó Ti)

E. G. ZAMORA-RODEA^{1,2}, D. A. ROMERO GARCÍA², A. DOMÍNGUEZ SILVERIO², D. ÁNGELES BELTRÁN¹, A. K. MEDINA MENDOZA¹, D. A. GARCÍA MARTÍNEZ², J. A. DE LOS REYES³, R. RÍOS ESCOBEDO³, R. ROSAS CEDILLO³, M.M. GONZÁLEZ BRAMBILA², J.C. GARCÍA-MARTÍNEZ⁴, J. A. COLÍN-LUNA^{2,*}

¹Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, CDMX, C.P. 02128, México

²Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, CDMX, C.P. 02128, México

³Departamento IPH, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Ciudad de México, CDMX, C. P. 09340, México

Autor de Correspondencia: José Antonio Colín Luna (e-mail: jazl@azc.uam.mx).

RESUMEN El sector del transporte, especialmente la aviación, enfrenta grandes desafíos en la transición energética, ya que tecnologías como la propulsión solar aún no son aplicables. En este contexto, los combustibles sostenibles de aviación, derivados de biomasa de segunda generación, se posicionan como una alternativa viable debido que son totalmente compatibles con los motores actuales sin necesidad de modificaciones. Una vía prometedora para producir SAF es el hidrotratamiento (HDT) de bioaceites de pirólisis. El bioaceite se trata con hidrógeno en presencia de un catalizador para eliminar el oxígeno. Para llevar a cabo esta reacción, se requieren catalizadores bifuncionales con propiedades específicas como sitios activos para la hidrogenación, acidez, oxofilicidad y vacancias de oxígeno. En este estudio, se analizaron catalizadores bimetálicos Ni-Pt soportados en SBA-15 modificada con Zr y Ti (Ni-Pt/SBA-Zr y Ni-Pt/SBA-Ti), usando eugenol como molécula modelo de compuestos fenólicos presentes en los bioaceites. Los resultados mostraron una conversión del 55 % para los catalizadores que contienen Zr, frente a un 60% de los de Ti. La selectividad hacia bioturbosina, fue del 25 % para Zr y 16 % para Ti. Entre los productos obtenidos se identificaron propilciclohexano, dihidroeugenol, propilfenol, y metileugenol, este último con valor comercial. Estos resultados se explican a partir de las propiedades oxofílicas del catalizador Ni-Pt/SBA-Zr.

PALABRAS CLAVE: HDO, biomasa lignocelulósica, catalizadores bifuncionales, oxofilicidad, biocombustibles

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, la demanda anual promedio de turbosina a nivel global aumentó de 260 a 340 millones de metros cúbicos (Mm³), y se estima que alcanzará los 500 Mm³ para 2026 [1]. Este crecimiento implica un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), tales como CO, CH₄, NO_x, SO_x y, de manera particular, CO₂, lo que contribuye al calentamiento global, la lluvia ácida y diversos problemas de salud en los seres vivos. Frente a estas problemáticas, surge la transición energética en la cual se busca el desarrollo de fuentes energéticas sustentables capaces de reducir las emisiones actuales de GEI, entre las cuales destacan los biocombustibles derivados de la biomasa. La biomasa se define como materia orgánica de origen animal o vegetal, ya sea virgen o residual. En los últimos años, la biomasa lignocelulósica (BL), compuesta principalmente por celulosa (35–50 %), hemicelulosa (25–30 %) y lignina (15–30 %), ha despertado un interés particular debido a que no compite con fuentes alimenticias [1-2]. La BL se encuentra en residuos forestales y agrícolas, como rastrojos de maíz, astillas de madera, bagazo de caña de azúcar y de agave [3]. Sin embargo, su compleja estructura hace necesaria una etapa de pretratamiento para su aprovechamiento energético. Uno de los métodos más utilizados es la pirólisis, un proceso térmico en ausencia de oxígeno, a partir del cual se obtiene un líquido conocido como bioaceite o aceite de pirólisis. No obstante, este producto presenta limitaciones como alta viscosidad, inestabilidad térmica y elevada corrosividad, atribuibles a su alto contenido de oxígeno. Para mejorar sus propiedades se requiere un proceso de desoxigenación mediante



hidrotratamiento (HDT) [2-4]. Dicho proceso consiste en tratar el bioaceite con una corriente de H_2 en presencia de un catalizador heterogéneo bifuncional, bajo condiciones moderadas de temperatura y presión, obteniéndose así un biocombustible compatible con motores de aviación, conocido como bioturbosina [3-4]. Para ser considerado bioturbosina, el producto debe estar conformado por n-parafinas (20 %), iso-parafinas (40 %), cicloalcanos (20 %) e hidrocarburos aromáticos (20 %), con cadenas carbonadas entre C_9 y C_{16} [5]. Estas características le confieren propiedades similares a las de la turbosina convencional.

Durante el HDT del bioaceite tienen lugar múltiples reacciones, entre ellas hidrogenación, isomerización, deshidratación e hidrogenólisis de compuestos oxigenados. Para llevarlas a cabo se requieren catalizadores bifuncionales, los cuales combinan sitios metálicos con sitios ácidos (Figura 1). Diversos autores [3-5] han señalado que las propiedades fundamentales de dichos catalizadores son: acidez, oxofiliidad, reducibilidad y capacidad de generar vacantes de oxígeno. Estas propiedades favorecen la activación del enlace C–O en moléculas orgánicas y la disociación del H_2 , necesarias para romper el enlace C–O y eliminar oxígeno en forma de agua. En este contexto, las sílices mesoporosas ordenadas han mostrado un alto potencial como soportes catalíticos en el HDT, debido a su gran área superficial, diámetros de poro superiores a 2 nm y facilidad para el transporte de reactantes. Dichas características permiten maximizar la dispersión de los metales activos y, en consecuencia, incrementar la actividad catalítica. Entre ellas, las sílices de tipo SBA (Santa Barbara Amorphous) y MCM (Mobil Composition of Matter) han demostrado su eficacia en diversos procesos catalíticos bajo atmósferas de H_2 , incluido el proceso de hidrodesoxigenación (HDO) [2-6]. Asimismo, se ha reportado que la incorporación de especies oxofílicas como Al, Zr y Ti en la estructura de la SBA-15 confiere ventajas adicionales, tales como mayor resistencia térmica, mejor estabilidad química y aumento de la acidez superficial, lo cual influye directamente en la selectividad catalítica y en la formación de productos deseados [6]. Con base en lo anterior, en el presente trabajo se evaluaron catalizadores monometálicos de Ni y Pt, así como bimetalicos Ni–Pt soportados en SBA-15 modificada con Ti a diferentes relaciones Si/Ti y Si/Zr, en el HDT de eugenol como molécula modelo de bioaceite para la obtención de bioturbosina [3-6].

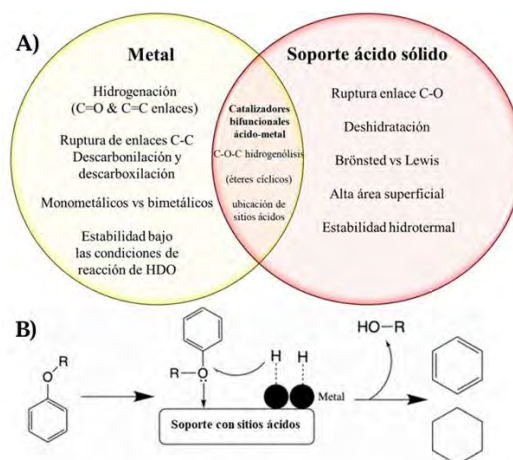


FIGURA 1. A) Variables de diseño del catalizador para el HDT de bioaceite, adaptado de [4,5] y B) Esquema general de catalizadores bifuncionales en el HDT de moléculas aromáticas oxigenadas, adaptado de [4]

2. METODOLOGÍA

2.1 Síntesis y caracterización del soporte y catalizadores

Para la síntesis del soporte SBA-15 se empleó el método sol-gel de autoensamblado, utilizando el copolímero tribloque Pluronic P-123 como agente surfactante y tetraetilortosilicato (TEOS) como fuente de silicio. En una preparación estándar, se pesaron 16 g de P-123 y se disolvieron en 473 mL de HCl (2 M) dentro de un recipiente de teflón de boca ancha, manteniendo la mezcla a 311 K bajo agitación constante hasta lograr la completa disolución del surfactante. Posteriormente, se incorporó el TEOS mediante adición gota a gota, continuando con la agitación durante 24 h a 311 K. Finalmente, el material sólido obtenido se secó a 383 K y fue sometido a un proceso de calcinación a 823 K con una rampa de calentamiento controlada [7].

Se incorporó Ti o Zr a la SBA-15 mediante la técnica del injerto químico [7-8]. Para esta síntesis, se empleó isopropóxido de titanio (IV) al 97 % (Sigma Aldrich) e isopropóxido de circonio (IV), Sigma Aldrich, como fuente de metal oxofílico. Se prepararon soluciones al 70% en peso de etanol absoluto (EtOH) de cada uno de los metales. La SBA-15 previamente seca se agregó a la solución de Ti o Zr y se mantuvo en mezcla vigorosa por 8 h a temperatura ambiente. El material obtenido se lavó con EtOH para



eliminar el exceso de reactivo sin reaccionar y se secó a temperatura ambiente. Finalmente, se calcinó en flujo de aire a 823 K durante 5 h. Las relaciones nominales Si/MO (MO = Ti o Zr) en masa de los soportes fueron de 2, 5, 10.

La fase metálica se incorporó mediante el método de impregnación en estado sólido sobre el soporte SBA-(MO) (X), la cantidad de Ni y de Pt fue de 1% en peso para cada metal. En cada impregnación se emplearon 5 g de soporte, el cual se mezcló con sales precursoras de Ni, y Pt, acetil acetatos (Sigma Aldrich). Posteriormente, los materiales impregnados fueron calcinados a 673 K con una velocidad de calentamiento de 10 K/min. Previo a la evaluación catalítica, los materiales fueron activados en una corriente de H_2 a 673 K durante 1 h, con una velocidad de calentamiento de 10 K/min y un flujo de 4 L/h [9]. Finalmente, los catalizadores fueron enfriados a temperatura ambiente mientras son purgados con un flujo de N_2 .

Los soportes y los catalizadores fueron analizados estructural y texturalmente por medio de difracción de rayos X (DRX) y fisisorción de N_2 . Para la DRX se registraron los patrones de difracción empleando la técnica de polvos en un difractómetro Bruker D8 utilizando radiación $CuK\alpha$ monocromatizada ($\lambda = 0.154$ nm). Se realizó la medición en un rango de 5 a 70° para la DRX a altos ángulos y en un rango de 0.5 a 7° para la DRX a ángulos bajos, ambos en una escala de 2 θ , con una velocidad de escaneo de 0.01° (2 θ) /s. Mientras que, los análisis de fisisorción de nitrógeno se llevaron a cabo a 77 K utilizando un equipo Micromeritics ASAP 2010. Las isotermas obtenidas se utilizaron para cuantificar las propiedades texturales de las muestras. El área específica o superficial (SBET) de las muestras se calcularon a través del método BET en un rango de presión estándar de 0.05 a 0.3 P/P₀. La caracterización morfológica y el análisis químico elemental del soporte y los catalizadores se realizó a través de MEB empleando un equipo ZEISS modelo SUPRA 55VP acoplado a un analizador de rayos X de dispersión de energía (MEB-EDS) operado a 200 KV y amplificaciones entre 10000X y 20000X, empleando la técnica de electrones retrodispersos. Los espectros FTIR de los soportes SBA-15 y SBA-MO (X) se obtuvieron en el rango del infrarrojo medio (4000–400 cm^{-1}) utilizando un espectrofotómetro IR Perkin-Elmer Frontier con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR). Los espectros fueron recolectados en modo de transmisión empleando 50 escaneos con una resolución espectral de 4 cm^{-1} a temperatura ambiente.

2.2 Evaluación catalítica

Los catalizadores fueron probados en el HDT de EUG (Sigma Aldrich) en un reactor por lotes de alta presión (Parr 4848) equipado con impulsor de propela y cámara de calentamiento. Inicialmente el reactor se cargó empleando 50 ml de *n*-dodecano (Sigma Aldrich), 2.5 g de EUG, y 0.25 g de catalizador, una vez agregados el reactor se cerró herméticamente. Las reacciones se llevaron a cabo a una temperatura de 573 K, presión de 3 MPa de H_2 y una velocidad agitación de 1500 rpm, el tiempo de reacción fue de 6 h [4, 6, 9]. Finalmente, los productos líquidos de la reacción se analizaron por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS).

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización de soporte y catalizadores

En la Figura 2 se muestran los patrones de DRX de la SBA-15 y de los materiales modificados con Ti y Zr a bajo ángulo, en el intervalo 0.55 a 5 ° en 2 θ , en los cuales se pueden identificar tres reflexiones bien definidas, características para la SBA-15: 0.9, 1.6 y 1.8 (2 θ), que corresponden a los planos (1 0 0), (1 1 0) y (2 0 0), respectivamente, y están asociados con la simetría hexagonal p6mm. Mientras que para los soportes con Ti y Zr se puede observar, las reflexiones que correspondían a los planos (1 1 0) y (2 0 0) disminuyen su intensidad, lo que podría implicar que la estructura mesoporosa inicial sufrió ciertas modificaciones durante el injerto, debidas probablemente a bloqueos parciales en los canales del soporte por parte de los metales impregnados en estos, que llevó a cierta pérdida de orden en la mesoestructura [7-8].

Las propiedades texturales de los soportes mesoporosos se encuentran en la Tabla 1. Inicialmente, la SBA-15 tenía un área superficial SBET tan alta como 665 m²g⁻¹ con VP de 1.02 cm³g⁻¹ y dP de 5.7 nm, resultados que coinciden con lo ya reportado en la literatura [7-8]. Para SBA modificado con Zr, se logró observar una variación del área de superficie con respecto al contenido de circonio. En particular, a contenidos altos de Zr, SBA-Zr (5) presenta una disminución del 17% en ese parámetro. Las relaciones Si/Zr por debajo de 5 del SBET tienden a disminuir debido a la formación de aglomerados de ZrO₂ no porosos. En términos del diámetro de poro dP y del volumen de poro VP, no se observaron cambios significativos por adición de Zr. Se registró un comportamiento similar con respecto al espesor de pared (EP) que fue prácticamente constante con un valor promedio de 7 nm, lo que sugiere que los sólidos preparados eran mecánica e hidrotermalmente estables.



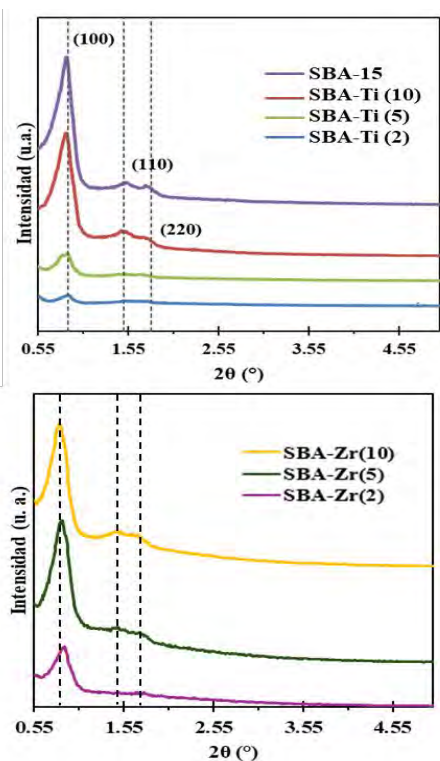


FIGURA 2. Patrones de DRX de la SBA-15 y soportes con Ti o Zr a diferentes relaciones másicas.

TABLA 1. Resultados de la fisisorción de N₂ para materiales SBA-15 en relaciones Si/Zr

Material	S _{BET} (m ² g ⁻¹)	V _p (cm ³ g ⁻¹)	d _p (nm)	d ₁₀₀ (nm)	a ₀ (nm)	E _p (nm)
SBA-15	665	1.02	5.7	11.2	12.9	7.2
SBA-Zr (5)	554	0.78	5.6	10.8	12.4	6.8
SBA-Zr (10)	553	0.84	5.8	11.1	12.8	7.0

S_{BET} = área superficial, V_p = volumen de poro, d_p = diámetro de poro, d₁₀₀ = distancia interplanar, a₀ = parámetro de celda unitaria (a₀ = 2 d₁₀₀ / √3), E_p = espesor de pared (E_p = a₀ - d_p).

Los espectros de infrarrojo de la SBA-15 y de los materiales mesoporosos modificados con Ti y Zr se muestran en la Figura 3. En la región de ~3600–3400 cm⁻¹ se observa una banda estrecha atribuida a las vibraciones de tensión de los grupos silanol (Si–OH) superficiales, así como al agua adsorbida en la superficie y en los poros del SBA-15. Adicionalmente, aparece una banda en 1633 cm⁻¹ asociada a las vibraciones de flexión del agua molecular adsorbida. Las

bandas de absorción a 1064 y 795 cm⁻¹ corresponden a las vibraciones de estiramiento asimétrico y simétrico del enlace siloxano (Si–O–Si), respectivamente. En el caso de la banda

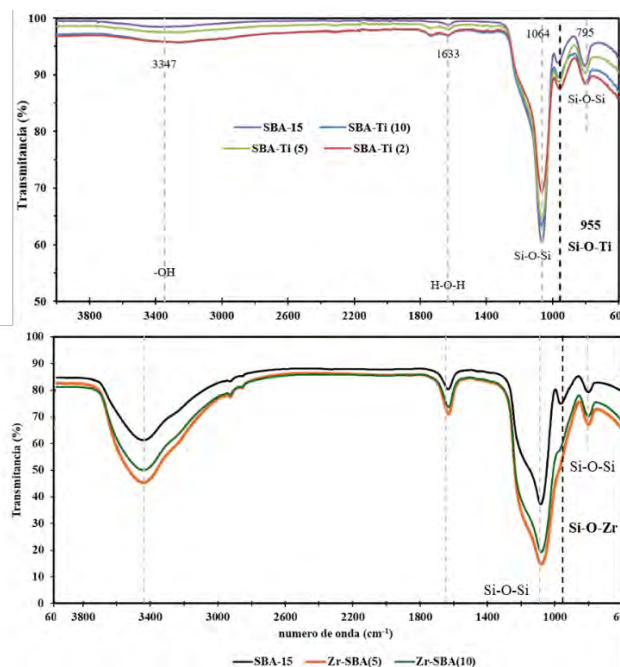


FIGURA 3. Espectros de FTIR de la SBA-15 y soportes SBA-(Ti o Zr) (X)

a 1064 cm⁻¹, su intensidad aumenta con el contenido de silicio en los soportes, de manera que la señal correspondiente al material SBA-Ti (2), con mayor concentración de Ti, presenta la menor intensidad (Figura 3). En contraste, la banda en 955 cm⁻¹, asociada a las vibraciones de estiramiento de los enlaces Si–O–Ti, se intensifica con el incremento de Ti, mientras que disminuye al aumentar el contenido de Si. La presencia de estas bandas confirma la formación de enlaces Si–O–Ti en los soportes modificados. En los materiales modificados con Zr, la banda alrededor de 960 cm⁻¹ se relaciona con la flexión de grupos silanol (Si–OH), la cual se atenúa en los espectros de las muestras Zr–Si. En la Figura 3, donde se presentan los espectros de los soportes con Zr tras restar la señal de la SBA, se observa una banda de absorción en torno a 975 cm⁻¹, atribuida al enlace Zr–O–Si, cuya intensidad aumenta proporcionalmente con la cantidad de circonio incorporado.

Las imágenes MEB del soporte SBA-15 se muestran en la Figura 4A) y 4B). El soporte SBA-15 mostró una morfología

regular similar a una fibra compuesta por muchas partículas en forma de varilla, semejante a lo reportado en trabajos previos [6,9]. Linton et al. [11] atribuye esta morfología a una asociación entre partículas dadas por un efecto térmico en la síntesis a temperaturas mayores a 343 K.

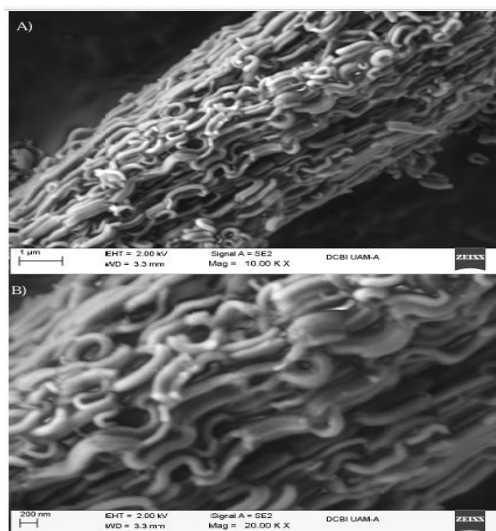


FIGURA 4. Imágenes MEB del soporte SBA-15: A) a 10000 magnificaciones, B) a 20000 magnificaciones

3.2 Evaluación catalítica

En la reacción de HDT del EUG empleando los catalizadores Ni, Pt y Ni-Pt soportados en SBA-(Ti o Zr)(X), se identificaron por CG-MS las siguientes especies: dihidroeugenol (DHE), *trans*-isoeugenol (TIE), 4-propilfenol (PFL), propilciclohexano (PC) y dihidrometileugenol (MMPB). La Tabla 2 presenta los valores de conversión, selectividad y actividad catalítica de los materiales evaluados. En general, la mayoría de los catalizadores alcanzaron conversiones cercanas al 50 % después de 6 h de reacción. Para los catalizadores modificados con Ti, el sistema Ni/SBA-Ti mostró una actividad ligeramente mayor y selectiva a DHE, lo que indica que la reacción predominante fue la hidrogenación del grupo propileno del EUG. Asimismo, se detectó la formación de PFL, lo cual evidencia que la reacción de desmetoxilación también tuvo lugar; sin embargo, no se observó la formación de PC, especie asociada a la ruta de HDO. En el caso del catalizador Pt/SBA-Ti (2), se obtuvo una conversión cercana

al 54 %, acompañada de un incremento en la selectividad hacia PFL y PC, atribuido a la mayor capacidad hidrogenante del Pt en comparación con el Ni. Esto sugiere que en este sistema se favorecieron las reacciones de desmetoxilación y HDO. Por su parte, el catalizador bimetalico NiPt/SBA-Ti (2) mostró un ligero aumento en la selectividad hacia PC, confirmando el favorecimiento conjunto de ambas rutas (desmetoxilación e HDO). En la Figura 5A se presenta la evolución de productos para el sistema NiPt/SBA-Ti (2), donde se aprecia que la formación de PC depende directamente de la desmetoxilación de DHE y de la generación de PFL. Dado que el intermedio más estable es el fenol ($C_{AR}-OH$), la producción de PC aumenta en la medida que se forma PFL. La ruta de reacción propuesta se muestra en la Figura 5C.

TABLA 2. Conversión, selectividad y constante de velocidad de reacción en el HDT de EUG empleando catalizadores bifuncionales

Catalizador	Conv. (%)	$k \times 10^3$ [s ⁻¹ g _{cat} ⁻¹]	R ²	Selecc. (%)				
				PC	MMPB	DHE	PFL	TIE
Ni/SBA-Ti (2)	48.65	0.23	0.87	0.00	10.27	76.52	7.87	2.20
Pt/SBA-Ti (2)	53.55	0.03	0.97	14.84	9.44	52.05	18.68	1.56
NiPt/SBA-Ti (2)	59.34	0.10	0.97	16.28	10.14	50.70	16.68	1.61
Pt/SBA-Ti (10)	52.80	0.02	0.99	12.01	8.67	65.02	10.29	0.90
NiPt/SBA-Zr (2)	55.55	0.09	0.97	17.5	7.71	43.76	14.31	2.2
NiPt/SBA-Zr (10)	55.77	0.05	0.97	18	8.1	42.03	16.1	1.6

Por otro lado, en términos del efecto de la cantidad de Ti incorporado al soporte se correlacionó con la presencia de MMPB, producto derivado de la eterificación del grupo $C_{AR}-OH$ con radicales metilo generados durante la ruptura de enlaces C-C del grupo propileno del EUG. Cabe señalar que, en términos de producción de SAF, esta reacción se considera no deseada. Además, se observó que, al disminuir la cantidad de Ti en el soporte, también disminuye la selectividad hacia MMPB. El orden de actividad de los catalizadores de Ti fue Ni/SBA-Ti (2) > NiPt/SBA-Ti (2) > Pt/SBA-Ti (2) > Pt/SBA-Ti (10).

En el caso de los catalizadores modificados con Zr, se alcanzaron conversiones ligeramente superiores, cercanas al 55 %. Se observó una selectividad del 42 % hacia DHE, lo que indica que la reacción predominante fue la hidrogenación del grupo propileno del EUG. Asimismo, se favoreció la reacción de desmetoxilación, con selectividades

del 14 y 16 % para los catalizadores NiPt soportados en SBA-Zr con relaciones 2 y 10, respectivamente. En cuanto a la formación de PC, los catalizadores con Zr mostraron una ligera mayor selectividad en comparación con los soportados en Ti.

catalizadores de Zr presentan una disminución en la selectividad en MMPB lo cual indica que son menos propensos a favorecer la reacción de eterificación.

4. CONCLUSIONES

El estudio de la reacción de HDT del eugenol sobre catalizadores monometálicos y bimetálicos (Ni, Pt y Ni-Pt) soportados en SBA modificada con Ti o Zr evidenció que la naturaleza del metal y del soporte influye significativamente en la conversión y en la ruta de reacción seguida. Los catalizadores basados en Ti mostraron conversiones cercanas al 50 %, con predominio de la hidrogenación del grupo propileno y formación de DHE como producto principal. La presencia de Pt incrementó la capacidad hidrogenante, favoreciendo además la desmetoxilación y la HDO, mientras que los sistemas bimetálicos NiPt promovieron de manera conjunta ambas rutas. Se identificó, asimismo, la formación de MMPB, asociada a la eterificación del grupo $C_{AR}-OH$, cuya selectividad disminuyó con la reducción del contenido de Ti en el soporte.

Por su parte, los catalizadores modificados con Zr alcanzaron conversiones ligeramente superiores (~55 %) y mostraron mayor selectividad hacia PC en comparación con los sistemas Ti, confirmando que la desmetoxilación de PFL constituye un paso clave hacia la HDO. A diferencia de los catalizadores con Ti, los sistemas con Zr presentaron menor tendencia a la formación de MMPB, lo que sugiere que este soporte es menos proclive a favorecer reacciones de eterificación no deseadas en el marco de la producción de SAF.

En conjunto, los resultados destacan que la incorporación de Zr en el soporte, en combinación con fases metálicas NiPt, ofrece una vía más selectiva hacia la desmetoxilación e hidrodesoxigenación, mientras que el Ti promueve reacciones adicionales de eterificación, reacción no deseada.

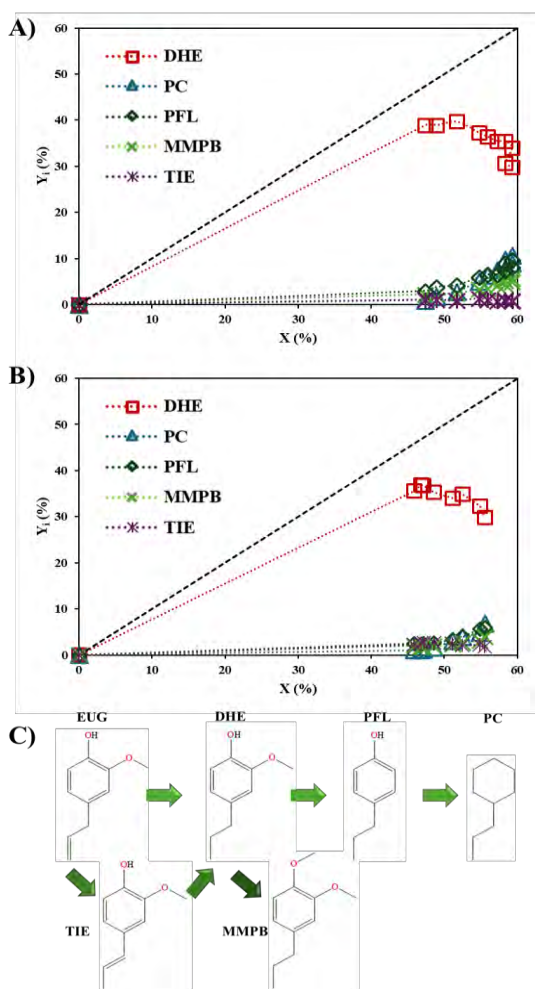


FIGURA 5. Gráficas de rendimiento vs conversión para los catalizadores A) NiPt/SBA-Ti(2), B) NiPt/SBA-Zr(2), C) ruta de reacción propuesta para el HDT de EUG

La Figura 5B presenta la gráfica de rendimiento en función de la conversión para el sistema NiPt/SBA-Zr (2), donde se aprecia que la formación de PC ocurre a partir de PFL como intermedio de reacción, comportamiento similar al observado con los catalizadores basados en Ti. Los

REFERENCIAS

- [1]. Wang M, Dewil R, Maniatis K, Wheeldon J, Tan T, Baeyens J, et al. Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. Prog Energy Combust Sci 2019;74:31–49. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.04.004>.
- [2]. Bomont L, Alda-Onggar M, Federov V, Aho A, Peltonen J, Eränen K, et al. Production of Cycloalkanes in Hydrodeoxygenation of Isoeugenol Over Pt- and Ir-



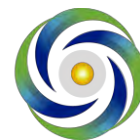
- Modified Bifunctional Catalysts. *Eur J Inorg Chem* 2018;2841–54.
<https://doi.org/10.1002/ejic.201800391>.
- [3]. Lup ANK, Abnisa F, Daud WMAW, Aroua MK. Acidity, oxophilicity and hydrogen sticking probability of supported metal catalysts for hydrodeoxygenation process. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 334, Institute of Physics Publishing; 2018.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012074>.
- [4]. Martínez Klimov, M., E., Hydrodeoxygenation of Lignin-Derived Model Compound for Sustainable Aviation Fuel Production Using Bifunctional Catalysts. ISBN, 2024, 978-952-12-4335-6
- [5]. Cheng F, Brewer CE. Producing jet fuel from biomass lignin: Potential pathways to alkyl-benzenes and cycloalkanes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;72:673–722.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.030>.
- [6]. Calzada LA, Pérez-Estrada D, Sánchez-Ramírez M, Gómora-Herrera D, Gómez-Cortés A, Díaz G, et al. Boosting hydrodeoxygenation activity and selectivity of Ni/(M)-SBA-15 catalysts by chemical alteration of the support. *ACS Omega* 2023;8,42849–4286.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05865>.
- [7]. Colín-Luna J A, Zamora-Rodea E G, Medina Mendoza A K, Alvarado-Perea L, Angeles-Chavez C, Escobar J M, Pacheco-Sosa J, Martínez J S. Zn supported on Zr modified mesoporous SBA-15 as sorbents of pollutant precursors contained in fossil fuels: Si/Zr ratio effect. *Catalysis Today*, 353, 63–72, 2020.
- [8]. Gutiérrez OY, Fuentes GA, Salcedo C, Klimova T. SBA-15 supports modified by Ti and Zr grafting for NiMo hydrodesulfurization catalysts. *Catal Today* 2006;116:485–97.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2006.06.035>.
- [9]. Colin, J.A., Zamora, G. E., Medina, A. K., Alvarado, L., Ángeles, C., Escobar, J., Pacheco, J. G., García, J.C. “Eugenol hydrodeoxygenation employing bifunctional Ni-Pd and Ni-Pt catalysis on zirconium pillared clays”. *Tecnología en Marcha*, 2023. doi. 10.18845/tm.v36i10.7006.
- [10]. Ochoa-Hernández C, Coronado J M, Serrano D P. Hydrotreating of Methyl Esters to Produce Green Diesel over Co- and Ni-Containing Zr-SBA-15 Catalysts. *Catalysts*, 2020, 10, 186.
- [11]. Linton, P., Hernandez Garrido, J., C., Midgley, P., A., Wennerstrom, H., Alfredsson, V. Morphology of SBA-15-directed by association processes and surface

energies. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2009, 11, 10973–10982



Emigdio Gregorio Zamora Rodea. Candidato a doctor en Ingeniería de Procesos en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), CDMX, México. Maestro en Ingeniería de Procesos e Ingeniero Químico en la UAM-A. Actualmente Profesor Investigador Asociado del área de Química del Departamento de Ciencias Básicas, UAM-A. Los intereses de investigación incluyen catálisis heterogénea, síntesis de catalizadores, modelamiento cinético, catálisis enzimática, química analítica, equilibrio termodinámico en reacciones químicas y producción de biocombustibles.





Obtención de biocombustibles sostenibles a partir de biocrudos: efecto de la mezcla y del sistema catalítico

E. G. ZAMORA RODEA^{1,2}, A. J. VÁZQUEZ FLORES², D. ÁNGELES BELTRÁN¹, J. AGUILAR PLIEGO¹, A. K. MEDINA-MENDOZA¹, N. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ², J. A. DE LOS REYES³, R. RÍOS ESCOBEDO³, R. ROSAS CEDILLO³, J. A. COLÍN LUNA^{2*}

¹Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, CDMX, C.P. 02128, México

²Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, CDMX, C.P. 02128, México

³Departamento IPH, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Ciudad de México, CDMX, C. P. 09340, México

Autor de correspondencia: José Antonio Colín Luna (e-mail: jazl@azc.uam.mx).

RESUMEN En el presente estudio, se abordó el HDT de mezclas modelo de eugenol (EUG) y ácido oleico (AO) en proporciones 20:80, 50:50 y 80:20. Se emplearon catalizadores de Ni-M (M = Pt o Pd) soportados en arcillas pilareadas con circonio (PILC-Zr), con cargas metálicas inferiores al 2 %. Estos catalizadores fueron caracterizados mediante difracción de rayos X, fisisorción de N₂, quimisorción de H₂ y microscopía electrónica de barrido. Los resultados mostraron conversiones casi completas para EUG y AO en 6 horas de reacción. Con la mezcla 20:80, el catalizador Ni-Pt/PILC-Zr fue el más activo, logrando 35 % de propilciclohexano (PC) y 15% de 4-propilfenol (4-PF), así como 80 y 88 % de C₁₇ y C₁₈ a partir de AO. Para la relación 50:50, el catalizador Ni-Pd/PILC-Zr presentó 89% y 25% de conversión de EUG y AO, con rendimientos de hasta 27% para 4-PF. Con la mezcla 80:20, Pt/PILC-Zr alcanzó conversiones del 96 y 100 %, obteniendo 38 y 45 % de C₁₇ y C₁₈. Con lo cual se favorecieron reacciones de hidrogenación, hidredesoxigenación, descarboxilación/descarbonilación y desmetoxilación.

PALABRAS CLAVE: Biocrudos, eugenol, ácido oleico, hidrotratamiento, catalizadores bimetalicos

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático avanza a un ritmo acelerado, impulsado principalmente por el aumento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno y azufre, generados por actividades humanas intensivas, incluyendo el uso de combustibles fósiles, la deforestación y diversas prácticas agroindustriales. En 2023, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) reportó un incremento de

aproximadamente 1.1 K en la temperatura media global anual respecto a los promedios históricos, una cifra alarmante [1]. Este fenómeno ha desencadenado consecuencias graves, como pérdida de biodiversidad, incendios forestales, deshielo acelerado e intensificación de eventos meteorológicos extremos. En este contexto, la transición energética surge como una estrategia clave, orientada tanto a optimizar el aprovechamiento de fuentes convencionales como a impulsar el desarrollo de energías más limpias y seguras, constituyendo uno de los mayores retos ambientales, sociales y económicos del siglo XXI.

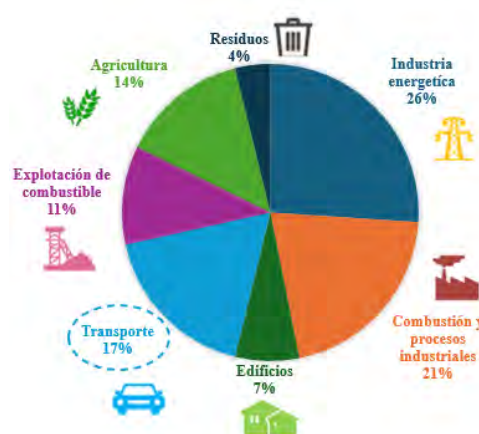


FIGURA 1. Emisiones de CO₂ por sector a nivel mundial en 2023, adaptada de [1].

El sector transporte es responsable de alrededor del 17 % de las emisiones globales de GEI, ver Fig. 1[1], incluyendo las provenientes del transporte terrestre, aéreo y marítimo. Las proyecciones indican que, sin la implementación de medidas efectivas de mitigación —como la electrificación de flotas, la



mejora en eficiencia energética y la adopción de biocombustibles—, dichas emisiones podrían incrementarse de forma significativa para 2050. En este marco, los biocombustibles como bioetanol, biodiésel, diésel verde y bioturbosina adquieren gran relevancia. Para la producción de biodiésel, diésel verde y bioturbosina, las principales materias primas son aceites vegetales, grasas animales residuales y biocrudos, compuestos principalmente por triglicéridos y ácidos grasos libres con cadenas hidrocarbonadas que oscilan entre C_{12} y C_{18} [2-3]. El biodiésel se obtiene mediante reacciones de esterificación y transesterificación, que producen ésteres metílicos en presencia de catalizadores básicos o ácidos fuertes en fase homogénea. En cambio, el diésel verde se produce por hidrotratamiento (HDT) de aceites y grasas, en presencia de hidrógeno y catalizadores heterogéneos bifuncionales que poseen sitios metálicos para la activación de hidrógeno y sitios oxofílicos para la activación de oxígeno. Este proceso elimina el oxígeno de las moléculas, generando hidrocarburos C_{12} – C_{18} equivalentes al diésel convencional [2-4].

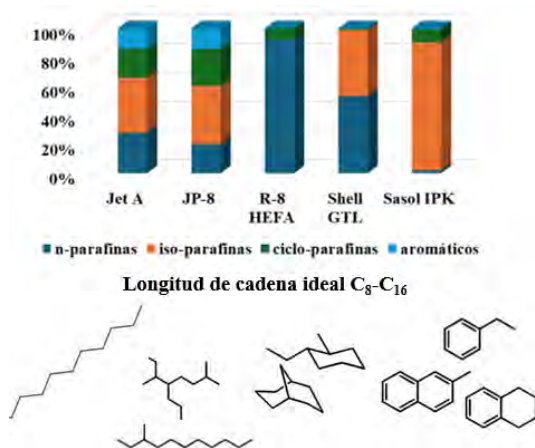


FIGURA 2. Composición del combustible de aviación convencional y bioturbosina, adaptado de [2-4].

El combustible de aviación renovable se puede obtener mediante una etapa adicional de craqueo de los hidrocarburos generados. La norma ASTM contempla diversas rutas para su obtención, incluyendo el mejoramiento de biocrudos derivados de la pirólisis de biomasa lignocelulósica. Estos bioaceites contienen más de 400 especies oxigenadas, entre ellas ácidos grasos de cadena corta, furfural, derivados de furano, cetonas, aldehídos,

alcoholes y compuestos fenólicos como el eugenol. El producto final debe presentar una composición dentro del rango del combustible de aviación, caracterizada por la presencia de compuestos aromáticos, cicloalcanos, n-alcanos e isoalcanos, en la Fig. 2 se muestra una comparación entre los combustibles convencionales de aviación y los obtenidos a partir de procesos ASTM [3-4]. Si bien múltiples estudios [2-4] han evaluado el HDT de biocrudos individuales, en los últimos años ha crecido el interés por el co-hidrotratamiento debido a sus ventajas: disminuye la reactividad de ciertos bioaceites y la polimerización que provoca la rápida desactivación catalítica; facilita la sostenibilidad en el suministro de materia prima; mejora la viabilidad económica y el escalado industrial de biorrefinerías; y aumenta la solubilidad del hidrógeno en el medio de reacción [2-3]. En este estudio se evaluó el co-hidrotratamiento de mezclas de biocrudos de eugenol (EUG) y ácido oleico (AO), en distintas proporciones, para la producción de bioturbosina y diésel verde. Se emplearon catalizadores bimetálicos de Ni-Pd o Ni-Pt soportados en PILC-Zr.

2. METODOLOGÍA

2.1 Síntesis y caracterización del soporte y catalizadores

La intercalación de circonio en la arcilla montmorillonita se llevó a cabo siguiendo el procedimiento reportado por Colín-Luna et al. [5]. En primer lugar, se preparó una suspensión al mezclar 10 g de bentonita sódica (Merck) con una solución agua acetona, con una relación volumétrica 50:50, con la finalidad de hinchar la arcilla. Por otro lado, se preparó una solución rica en circonio empleando de cloruro de circonilo (Sigma-Aldrich) 0.1 M a temperatura ambiente, esta solución se dejó madurar por 7 días previo al proceso de intercalación. Posteriormente, se añadió la solución oligomérica de Zr a la suspensión de arcilla mediante un goteo lento, mientras se agitaba vigorosamente a 313 K durante 4 horas. Finalmente, la arcilla se filtró y se lavó con agua desionizada hasta eliminar los cloruros, se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 h y se calcinó a 823 K mediante calentamiento lento. La incorporación de la fase metálica se realizó a través del método de impregnación en estado sólido empleando como sales precursoras acetilacetatos de Ni, Pd y Pt. Por último, el precursor de catalizador fue calcinado a 773 K. Previo a la evaluación catalítica, los catalizadores calcinados fueron activados en una corriente de H_2 a una temperatura de 623 K por 1 h con una velocidad de calentamiento de 10 K/min bajo un flujo gaseoso de 4 L/h [5].



El soporte y los catalizadores fueron caracterizados por diferentes técnicas de análisis: DRX, fisisorción de N_2 , quimisorción de H_2 y microscopia electrónica de barrido (MEB). La estructura laminar de la montmorillonita original, el soporte PILC-Zr y los catalizadores Ni-Pd y Ni-Pt se determinaron mediante DRX empleando un equipo Brucker acoplado a un tubo de rayos X de radiación de $CuK\alpha$ ($\lambda = 1.5406$ nm) en el rango del ángulo 2θ de 2 a 80° , velocidad de escaneo de 2 $^\circ/s$ operando a 35 kV y 20 mA. Para dicho análisis se empleó la técnica de polvos. A partir de las reflexiones basales de los metales se estimó el tamaño de las partículas metálicas a través de la ecuación de Scherrer. Para la determinación de las propiedades texturales tales como el área superficial (S_{BET}), diámetro (D_p) y volumen de poro (V_p) de los distintos materiales, se empleó un equipo Micromeritics 2100E en un sistema volumétrico estático usando nitrógeno como adsorbato a 75.5 K. Las muestras fueron previamente desgasificadas a 470 K por 24 h bajo alto vacío.

Los catalizadores mono y bimetalicos fueron analizados por quimisorción de H_2 a la temperatura ambiente en un equipo diseñado en el laboratorio. Se determinaron el porcentaje de dispersión (%D), área metálica (S_m) y tamaño de partícula (D_p). Previo a este análisis los materiales fueron reactivados en una atmósfera de H_2 a 623 K por 1 h. Después fueron desgasificadas durante 2 h manteniendo una temperatura de 623 K y un vacío de 1.33×10^{-7} MPa. Las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente manteniendo el vacío y se inyectaron pulsos de hidrógeno a una presión de 1.33×10^{-3} MPa permitiendo que las muestras lleguen al equilibrio y determinar la cantidad de hidrógeno adsorbido a través de la ecuación de gas ideal.

La caracterización morfológica de los catalizadores se realizó a través de microscopia electrónica de barrido (MEB), en el cual se empleó un equipo ZEISS modelo SUPRA 55VP acoplado a un analizador de rayos X de dispersión de energía (MEB-EDS) operado a 200 KV y ampliaciones entre 10000X y 20000X, empleando la técnica de electrones retrodispersos. El análisis MEB-EDS se realizó mediante un detector de estado sólido tipo SDD.

2.2 Evaluación catalítica

El HDT de la mezcla eugenol/ácido oleico (EUG/AO) se llevó a cabo en un reactor por lotes de alta presión equipado con un sistema de agitación tipo propela y cámara de calentamiento. Inicialmente, se cargó el reactor con 50 mL de *n*-dodecano como solvente, 2.5 g de la mezcla EUG/AO en distintas proporciones en peso de AO (20, 50 y 80 %) [4-5] y 0.25 g de catalizador. Las condiciones de reacción

fueron: una presión de 3 MPa y una temperatura de 573 K durante 6 h. Se colectaron muestras líquidas en intervalos regulares de tiempo y fueron analizadas a través de cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización de soporte y catalizadores

En la Figura 3 se muestran los patrones de difracción de rayos X correspondientes a la montmorillonita (Mt), al soporte PILC-Zr y a los diferentes catalizadores impregnados con 1 % en peso de Ni, Pd y Pt, así como a los catalizadores bimetalicos 1Ni-1M (M = Pd o Pt). En la Figura 1A, el difractograma de la Mt presenta el pico principal asociado a la reflexión basal $d(001)$, localizado a 7.5° en 2θ , además de las señales características de Mt, cristobalita (C) y cuarzo (Q), a 19.6° , 22° y 26.7° en 2θ , respectivamente. En la Figura 1B, el soporte PILC-Zr exhibe un desplazamiento del pico basal $d(001)$ hacia valores menores de ángulo, ubicándose en 5.1° de 2θ . Este corrimiento confirma la intercalación de cationes y la formación de pilares de ZrO_2 , lo que incrementa la distancia interlaminar de 1.3 a 1.9 nm, manteniendo la organización laminar propia de la arcilla. Los difractogramas de los catalizadores después de la impregnación, Figuras 1C-1G, muestran que el proceso no altera significativamente el arreglo laminar. En la Tabla 1 se presentan las distancias interlaminares del soporte y de los catalizadores sintetizados, observándose que los materiales con Ni, Pd y Pt en distintas relaciones metálicas no exhibieron cambios relevantes en el espaciamiento interlaminar. No obstante, se identificaron picos de difracción en 37.23° y 43.58° , correspondientes a los planos (111) y (200) de la fase cúbica centrada en la cara (fcc) del Ni (JCPDS: 04-0835). Para los catalizadores con Pd se detectaron señales en 40.5° y 46.8° , asociadas a los planos (111) y (200) de la estructura fcc del Pd (JCPDS No. 46-1043), mientras que en los materiales con Pt aparecieron picos en 39.7° y 46.4° , atribuidos a los planos (111) y (200) de la fase fcc del Pt (JCPDS No. 04-0802). Además, se determinaron los tamaños de cristal a través de la ecuación de Scherrer, los cuales se muestran en la Tabla 1. El tamaño promedio de partícula de las nanopartículas de Ni depositadas estimada fue de 30 nm, Pd de 14 nm y Pt de 12 nm.



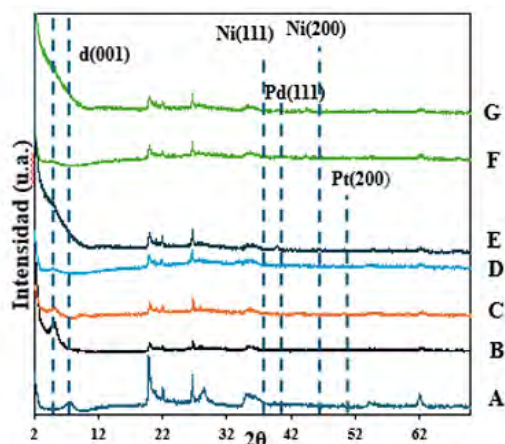


FIGURA 3. Patrones de difracción de los diferentes catalizadores: A) Bentonita; B) PILC-Zr; C) 1 % Pd; D) 1% Ni 1%Pd; E) 1 % Ni; F) 1 % Pt; G) 1% Ni 1%Pt, soportados en PILC-Zr

En la Figura 4 se presentan las isotermas de adsorción-desorción correspondientes a la arcilla natural, el soporte PILC-Zr y los catalizadores mono y bimetalicos. A bajas presiones relativas se observa la formación de una monocapa en la región de microporos; conforme aumenta la presión relativa, la adsorción progresa de mono a multicapas hasta alcanzar la condensación capilar, comportamiento típico de materiales meso- y macroporosos. El punto B definido por la IUPAC señala el final de la monocapa y el inicio de la adsorción en multicapas.

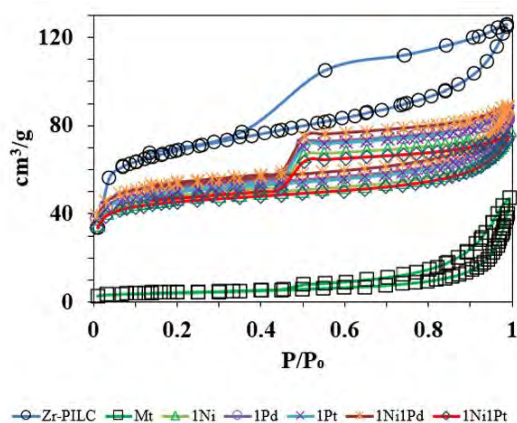


FIGURA 4. Isotermas de adsorción – desorción de la bentonita, soporte PILC-Zr y los catalizadores mono y bimetalicos de Ni, Pd y Pt

El soporte PILC-Zr muestra un lazo de histéresis tipo H3, asociado a poros en forma de cuña o placas paralelas, característicos de arcillas pilareadas. En el rango de $p/p_0 \approx 0.43$ se evidencia un mecanismo de desorción relacionado con poros de tipo “tintero”. De manera consistente, los catalizadores Ni, Pd, Pt, NiPd y NiPt/PILC-Zr también presentan isotermas con histéresis H3, indicando una similitud en la estructura porosa. Los valores de área superficial calculados mediante el método BET, mostrados en la Tabla 1, confirman que PILC-Zr incrementó aproximadamente diez veces el área respecto a la bentonita original. Tras la impregnación metálica, el área disminuyó siguiendo la tendencia: PILC-Zr > 1Ni1Pd > 1Pd > 1Pt > 1Ni > 1Ni1Pt.

Los análisis de quimisorción de H_2 mostraron dispersiones metálicas de 41, 21 y 5 % para los catalizadores de Pd, Pt y Ni soportados en PILC-Zr, respectivamente. Mientras que, para los catalizadores bimetalicos, rebasaron el 60 % de dispersión. En particular, el material Ni-Pd/PILC-Zr presentó la mayor superficie metálica disponible, tanto por gramo de catalizador como por gramo de metal, Tabla 1, lo que indica una elevada densidad de sitios activos accesibles.

En la Figura 5 se presenta una micrografía del catalizador NiPd/PILC-Zr, en la que se puede observar la distribución de las partículas de Pd y níquel Ni el soporte. En el caso del soporte, no se identificaron agrupaciones de ZrO_2 , lo que indica que los cationes de circonio se encuentran distribuidos de manera homogénea. El análisis EDS confirma la presencia de Zr, así como de óxidos de silicio (Si), aluminio (Al) y hierro (Fe), entre otros. En la micrografía, los átomos de Zr se representaron en verde, el Pd en azul, mostrando una distribución uniforme de las partículas, mientras que el Ni, marcado en morado, presentó partículas de mayor tamaño, lo cual podría influir directamente en la actividad catalítica del material.

3.2 Evaluación catalítica

En la evaluación catalítica del HDT de las mezclas EUG-AO (20:80, 50:50 y 80:20), el análisis de la fase líquida a través de CG/MS se encontró la presencia de productos derivados del AO, así como del EUG. Del AO se identificaron heptadecano (C_{17}) y octadecano (C_{18}), asociados a reacciones de descarbonilación/descarboxilación e HDO, respectivamente. Mientras que para el EUG se detectaron dihidroeuogenol, 4-propilfenol (4-PF), vinculados a reacciones de hidrogenación y desmetoxilación, así como propilciclohexano (PC), este último a través de la reacción de HDO del EUG, característico de fracciones de combustible de aviación, mientras que C_{17} y C_{18}

corresponden a moléculas representativas del diésel verde.

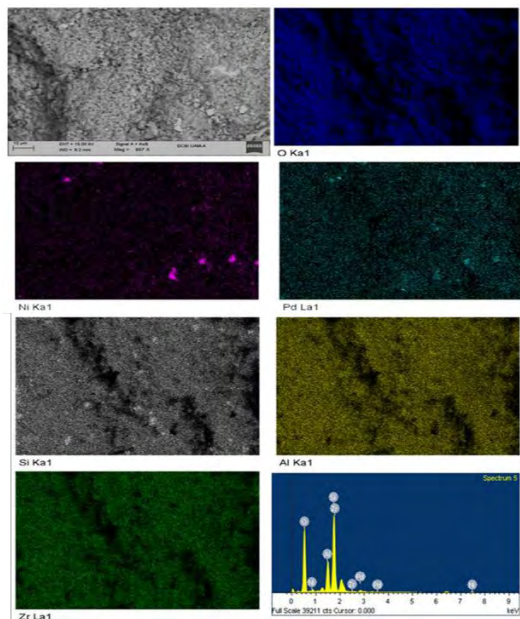


Figura 5. Micrografía MEB, mapeo SEM-EDS y su espectro EDS del catalizador Ni-Pd/PILC-Zr

En la mayoría de las pruebas, se alcanzaron conversiones cercanas al 100 % de EUG y AO después de 6 h de reacción. Para la mezcla 20:80, el orden de actividad obtenido fue Ni-Pt > Pt > Ni-Pd > Pd > Ni, destacando el catalizador bimetalico Ni-Pt/PILC-Zr con rendimientos de 35 % a PC, 15 % a 4-PF, y para los productos del AO 80 y 88 % para C₁₇ y C₁₈, respectivamente, tal como se muestra en la Tabla 2. En la relación 50:50, el orden cambió a Ni-Pd > Pd > Pt > Ni-Pt > Ni, siendo Ni-Pd/PILC-Zr el más activo, con conversiones de 89 % (EUG) y 25 % (AO), y rendimientos de 22 % (PC), 27 % (4-PF), 13 % (C₁₇) y 12 % (C₁₈). Para la mezcla 80:20, el orden fue Pt > Ni-Pd > Ni-Pt > Pd > Ni, destacando Pt/PILC-Zr con conversiones de 96 % (EUG) y 100 % (AO), y rendimientos de 26 % (PC), 14 % (4-PF), 38 % (C₁₇) y 45 % (C₁₈).

En general, los catalizadores monometálicos mostraron menores rendimientos frente a los bimetalicos. Los metales nobles resultaron particularmente efectivos para la producción de PC (combustible de aviación), lo que se relaciona con su mayor capacidad de activar H₂ y favorecer reacciones de desmetoxilación e HDO. Pd/PILC-Zr promovió principalmente la vía de descarboxilación/descarboxilación (C₁₇), mientras que

Pt/PILC-Zr favoreció simultáneamente la DCO/DCO₂ y la HDO (C₁₇ y C₁₈). Los sistemas bimetalicos evidenciaron efectos sinérgicos, reflejados en un mejor balance entre C₁₇ y C₁₈, atribuible a interacciones geométricas, electrónicas y bifuncionales, respaldadas por los análisis de DRX y quimisorción de H₂, así como por la acidez moderada del soporte.

TABLA 2. Actividad catalítica de los catalizadores mono y bimetalicos sobre PILC-Zr para las diferentes relaciones EUG-AO

Relación EUG-AO	Catalizador soportado sobre PILC-Zr	k x 10 ⁻⁴ (s ⁻¹ g _{cat} ⁻¹)	R ²
20-80	Pd	6.4	0.9908
	Pt	18.9	0.9846
	Ni	0	-
	Ni-Pd	8.5	0.9912
	Ni-Pt	21.9	0.9938
	Pd	9.0	0.9975
50-50	Pt	8.8	0.9952
	Ni	3.5	0.9067
	Ni-Pd	10.5	0.9644
	Ni-Pt	7.6	0.9858
	Pd	3.3	0.9909
	Pt	6.7	0.9909
80-20	Ni	3.2	0.9999
	Ni-Pd	5.0	0.9963
	Ni-Pt	3.6	0.9945
	Pt	3.6	0.9945

Respecto al efecto de la composición de la mezcla, un mayor contenido de AO (20:80) favoreció la relación H/C, aumentando la solubilidad de H₂ y, en consecuencia, los rendimientos tanto de PC (aviación) como de C₁₇ y C₁₈ (diésel verde). En mezclas 50:50 y 80:20, los catalizadores bimetalicos, en particular Ni-Pt/PILC-Zr, alcanzaron rendimientos de hasta ~40 % en C₁₇ y C₁₈, lo que representa una ventaja bajo condiciones de baja disponibilidad de aceites vegetales.



TABLA 1. Propiedades texturales y estructurales de bentonita, soporte PILC-Zr y catalizador mono-, bimetalico sobre Zr-PILC

Material	S _{BET} [m ² /g] ^a	V _P ^b [cm ³ /g] ^b	d ^P [nm] ^c	2θ ^d [°]	d [nm] ^e	Ni ^f (nm)	Pd ^f (nm)	Pt ^f (nm)	Cons. H ₂ (μmol/g ⁻¹)	εD _m (%)	S _m ^h (m ² ·g _{cat} ⁻¹)	D _p ⁱ (nm)
Mont.	10	0.09	0.97	7.45	1.32	-	-	-	-	-	-	-
PILC-Zr	211	0.19	3.87	5.14	1.91	-	-	-	-	-	-	-
Ni	159	0.12	3.87	5.23	1.88	31	-	-	9.1	5.4	0.4	18.8
Pd	174	0.13	3.89	5.06	1.94	-	10	-	38.9	41.4	1.8	2.7
Pt	191	0.19	3.88	4.87	1.81	-	-	15	10.7	20.8	0.5	5.5
Ni-Pd	182	0.13	3.88	5.06	1.94	30	10 <	-	77.7	82.7	3.7	1.4
Ni-Pt	154	0.05	3.87	5.53	1.74	26	-	8.3	34.8	67.9	1.7	1.7

^aS_{BET}: área superficial BET; ^bV_P: Volumen de poro; ^cd_p: diámetro poro; ^d2θ: ángulo de reflexión del plano d(001); ^ed: espacio interlaminar calculado empleando la ley de Bragg; ^fcalculado a través de la ecuación de Scherer; ^gD_m: porcentaje de dispersión; ^hS_m: área metálica; ⁱD_p: diámetro de partícula.

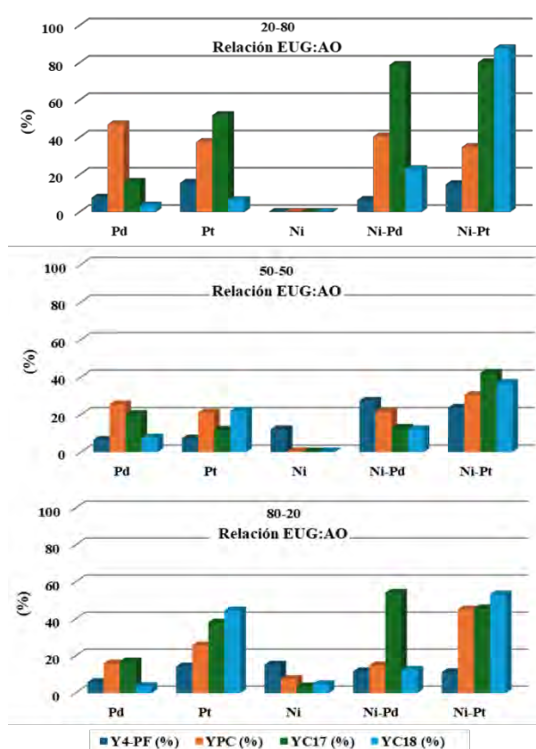


FIGURA 6. Rendimientos de los principales productos en el HDT de mezclas a diferentes relaciones másicas EUG-AO

4. CONCLUSIONES

La incorporación de cationes de circonio en la montmorillonita modificó sus propiedades estructurales y texturales, incrementando el espacio interlaminar de 1.3 a 1.9 nm y alcanzando un área superficial de 211 m²/g. Lo que permitió dispersar las diferentes fases activas. Siendo el catalizador de Ni-Pd el que presentó una mayor dispersión

metálica, lo que se tradujo en una mayor actividad catalítica en la conversión de mezclas de biocrudos.

En términos de las distintas relaciones de las mezclas, en todos los casos se favoreció la ruta de la HDO del AO, dicha ruta no se favorece al trabajar con el AO solo. Para la relación 20-80 y los catalizadores bimetalicos se beneficiaron las rutas del HDO del EUG y AO obteniendo así mayor cantidad de productos desoxigenados.

Este estudio aporta información importante en términos de la disposición del tipo de biocrudo que se pudiera tener y del tipo de biocombustible que se puede obtener. Lo que resalta la ventaja de la sostenibilidad de las mezclas de biocrudos, cuya flexibilidad en la disponibilidad de materias primas asegura su viabilidad en la producción continua de combustibles renovables.

REFERENCIAS

- [1]. Ormond, N., Kamel, D., Lima, S., Saha, B. "Production of Sustainable Liquid Fuels". *Energies* 2024, 17(14), 3506; doi: 10.3390/en17143506
- [2]. Robinson, A., Hensley, J., Medlin, J. "Bifunctional Catalysts for Upgrading of Biomass-Derived Oxygenates: A Review". *ACS catalysis*, 2016, vol. 6, no 8, p. 5026-5043. doi: 10.1021/acscatal.6b00923
- [3]. Manrique R., Chejne F., Olarte M. García M. (2024). "Co-Hydrotreatment of Pyrolytic Lignin and Waste Cooking Oil to Produce Hydrocarbons". *Energy & Fuels*, 2024, vol. 38, no 9, p. 7917-7928. doi: 10.1021/acs.energyandfuels.3c05177
- [4]. Denson, M., Manrique, R., Olarte, M., Garcia, M. "Co-hydrotreatment of bio-oil and waste cooking oil to produce transportation fuels". *Energy & Fuels*, 2024, vol. 38, no 8, p. 6982-6991. doi: 10.1021/acs.energyfuels.3c05175.





- [5]. Colin, J.A., Zamora, G. E., Medina, A. K., Alvarado, L., Ángeles, C., Escobar, J., Pacheco, J. G., García, J.C. “Eugenol hydrodeoxygenation employing bifunctional Ni-Pd and Ni-Pt catalysis on zirconium pillared clays”. *Tecnología en Marcha*, 2023. doi. 10.18845/tm.v36i10.7006.
- [6]. Alonso, D. M., Wettstein, S. G., Dumesic, J. A. “Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals”. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(24), 8075-8098.



Emigdio Gregorio Zamora Rodea.

Candidato a doctor en Ingeniería de Procesos en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), CDMX, México. Maestro en Ingeniería de Procesos e Ingeniero Químico en la UAM-A. Actualmente Profesor Investigador Asociado del área de Química del Departamento de Ciencias Básicas, UAM-A. Los intereses de investigación incluyen catálisis

heterogénea, síntesis de catalizadores, modelamiento cinético, catálisis enzimática, química analítica, equilibrio termodinámico en reacciones químicas y producción de biocombustibles.

