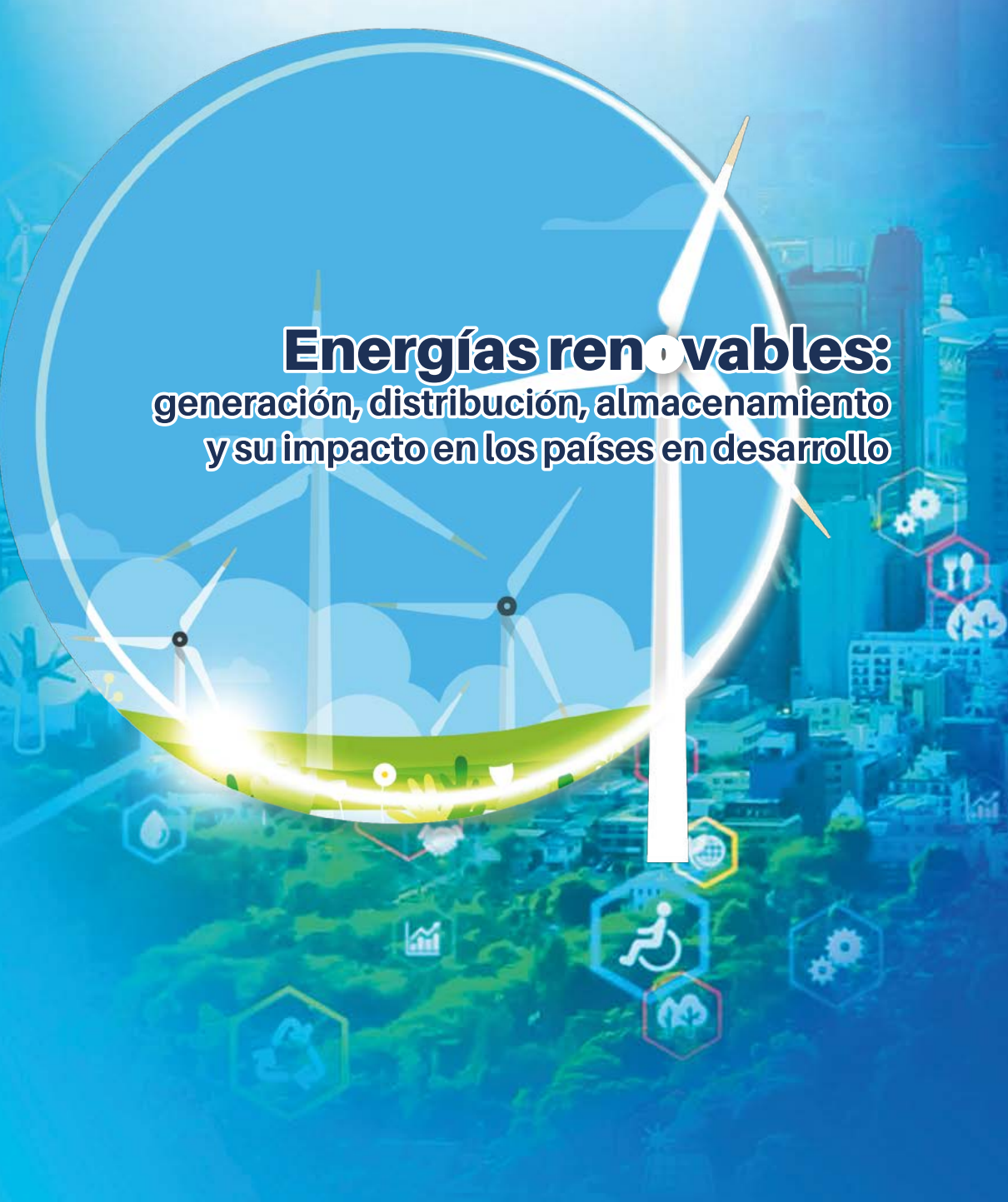




Energías renovables: generación, distribución, almacenamiento y su impacto en los países en desarrollo



Coordinadores

Francisco Navarrete Báez
Belkis Sulbarán Rangel

Energías renovables: generación, distribución, almacenamiento y su impacto en los países en desarrollo



Energías renovables: generación, distribución, almacenamiento y su impacto en los países en desarrollo

Francisco Ernesto Navarrete Báez
Belkis Sulbarán Rangel



Energías renovables: generación, distribución, almacenamiento y su impacto en los países en desarrollo. **Autores-coordinadores:** Francisco Ernesto Navarrete Báez y Belkis Sulbarán Rangel. —Guadalajara, Jalisco, México. 2025.

Publicación electrónica digital: descarga y *online*; detalle de formato: EPUB

Primera edición: 2025

ISBN: **979-13-87837-05-1**

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20251932>



D. R. © copyright 2025. Francisco Ernesto Navarrete Báez; Belkis Coromoto Sulbaran Rangel.

Portada: Nadine Rivera Larios

Edición y corrección: **Astra Ediciones**

El material de este libro ha sido evaluado por pares en la modalidad doble ciego y refleja opiniones y contenidos de la exclusiva responsabilidad del(a) o de los(as) autores(as). La responsabilidad de figuras, mapas, etc., que posean derecho de autor recae en los(as) autores(as).

Financiado por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) con fondos del Ministerio Federal para la Cooperación Económica y el Desarrollo (BMZ).



Deutscher Akademischer Austauschdienst
German Academic Exchange Service



Todos los contenidos de esta obra se comparten bajo la licencia Creative Commons Atribución/Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (**CC BY-NC-SA 4.0**). Esto implica que no está autorizado el uso comercial de la obra original ni de las eventuales obras derivadas, las cuales deberán distribuirse bajo la misma licencia que rige la obra original. No obstante, se permite a terceros compartir el contenido siempre y cuando se reconozca debidamente la autoría y la publicación original en esta editorial.

HECHO EN MÉXICO | MADE IN MEXICO

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE ATEMAJAC

Pbro. Lic. Francisco Ramírez Yáñez
Rector

Dra. María Cristina Martínez Arrona
Directora general académica

Pbro. Lic. Armando González Escoto
Director de publicaciones

Dra. Yadira del Refugio Robles Irazoqui
Directora plantel UNIVA Guadalajara

Mtra. María Guadalupe Jiménez Hernández
Directora de posgrados, investigación y educación continua

Dra. Sandra Pascoe Ortiz
Jefa de investigación UNIVA Guadalajara

Dr. Francisco Ernesto Navarrete Báez
Profesor investigador

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

CENTRO UNIVERSITARIO DE TONALÁ

Mtra. María Felicitas Parga Jiménez
Rectora

Mtro. César Ernesto González Coronado
Secretario académico

Dra. Irene Gómez Jiménez
Directora de División de Ingeniería e Innovación Tecnológica

Dr. Alberto Coronado Mendoza
Director del Instituto de Energías Renovables

Dra. Belkis Coromoto Sulbarán Rangel
Coordinadora de la maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la Energía

Contenido

Prólogo	13
----------------------	-----------

Capítulo 1

Energía renovable y desafíos para una transición energética justa e inclusiva: el contexto energético de Honduras	17
---	----

Miguel Ángel Figueroa Rivera

Jorge Alfredo Cárcamo Ardón

Jair Isaac Nazar Alfaro

Roberto Alfonso Zapata Quiroz

Marco Antonio Flores Barahona

Capítulo 2

Energía, eficiencia y calidad en el secado de alimentos: el caso de la verdolaga.....	39
---	----

Beatriz Castillo-Téllez

Margarita Castillo Téllez

Martha Fabiola Martín del Campo

Gerardo Alberto Mejía Pérez

Alfredo Domínguez Niño

Capítulo 3

Gestión energética en MIPYMES de Bogotá – Colombia: desafíos y oportunidades bajo el marco de políticas gubernamentales.....	73
--	----

Flover Artunduaga Lizcano

Lorena Galvis

Obed Fragozo Manjarrez

Harold Castilla De Voz

Capítulo 4

Edificios inteligentes: el papel de la IA en la transición energética y en el cambio de conducta del ciudadano..... 97

Alberto Coronado-Mendoza

Israel Guadalupe Hernández Villaseñor

Ángel Oswaldo Gama Camacho

Luis Manuel Sapien Macías

Jesús Octavio Quezada Rosas

Capítulo 5

Transición energética en la industria automotriz 123

Francisco Ernesto Navarrete Báez

Capítulo 6

Calentamiento de agua en albercas con energía solar térmica una alternativa para obtener energía asequible y no contaminante 143

Maximiliano Rivera-Mendoza

Alejandro Garza Galicia

Virgilio Zúñiga Grajeda

Belkis Sulbarán-Rangel

Capítulo 7

Diseño bioclimático: análisis bibliométrico..... 161

Francisco Javier Sol Sampedro

Aracely López Grijalva

Raúl Pavel Ruíz Torr

Imer López Grijalva

Xochitl Berenise Gonzales Torres

Capítulo 8

El enfoque del discurso humanismo mexicano a discusión en la política ambiental y energética de México 2025-2030 177

Gloria Esther Briceño Alcaraz

Capítulo 9

Concentradores solares luminiscentes. Prospectiva en el sector energético a corto, mediano y largo plazo 195

Víctor Hugo Romero Arellano

José Miguel Blancas Flores

Mackenson Polché

Belkis Sulbarán Rangel

Carlos Alberto Guzmán González

Capítulo 10

Los puntos cuánticos y la energía renovable 209

Carlos Rudamas

José Ricardo Estrada García

Oscar Deodanes

Nelson Cisneros

Jorge Cuadra

Luis Miguel Alvarenga Jacobo

Capítulo 11

Uso de residuos de plástico para producción de energía y de otros productos químicos de alto valor 227

Alan Castro-Solano

María Fernanda Chagoyán-Bernardo

Itzel Del Carmen Fonseca-Barrera

Patricia Guillermina Mendoza García

Carolina Peña-Montes

Capítulo 12

Diodos orgánicos emisores de luz (Oled) basados en el polímero conductor Poli(3,4-Etilendioxitiofeno) (PEDOT) 247

María de los Ángeles Vargas Hernández

María de la Luz Delgadillo Torres

Capítulo 13

Análisis exergético no estacionario de un calentador solar de aire de placa plana con diferentes rugosidades en el absorbedor.....275

Gustavo Espinosa García

Guillermo Ibáñez Duharte

Orlando Lastres Danguillecourt

Prólogo

El crecimiento acelerado de la población mundial, junto con el incremento en la demanda de energía por diversas causas como el calentamiento global, entre otras, ha puesto de manifiesto la necesidad imperante de transformar el sistema energético global. La eficiencia energética junto con las energías renovables y los sistemas de gestión energética, emergen como una respuesta contundente a este reto, ofreciendo soluciones sostenibles que no solo mitigan el cambio climático, sino que también promueven un desarrollo económico y social inclusivo. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías no está exenta de desafíos. Este libro, titulado *Energías Renovables: Generación, Distribución, Almacenamiento y su Impacto en los Países en Desarrollo*, ofrece una perspectiva integral sobre las oportunidades y los obstáculos que enfrentan las naciones en el camino hacia una transición energética justa y sostenible.

El contenido de esta obra se estructura en trece capítulos que abordan temas diversos y relevantes. Cada capítulo aporta una visión única y basada en evidencias sobre aspectos clave del panorama energético actual, destacando estudios de caso y análisis teóricos que enriquecen la comprensión de las energías renovables y su aplicación en diferentes contextos.

En el primer capítulo, “Energía renovable y desafíos para una transición energética justa e inclusiva: el contexto energético de Honduras”, se analizan las particularidades del sistema energético hondureño, destacando los retos estructurales y las oportunidades para implementar soluciones sostenibles. Este capítulo ofrece un marco para comprender la complejidad de la transición energética en países con recursos limitados y desigualdades sociales significativas.

El segundo capítulo, “Energía, eficiencia y calidad en el secado de alimentos: el caso de la verdolaga”, explora el uso de tecnologías renovables en la industria alimentaria, un sector fundamental para garantizar

la seguridad alimentaria global. A través del estudio del secado de la verdolaga, se demuestra cómo la energía solar puede integrarse en procesos industriales para mejorar su eficiencia y sostenibilidad.

En el tercer capítulo, “Gestión energética en MIPYMES de Bogotá-Colombia: desafíos y oportunidades bajo el marco de políticas gubernamentales”, se examina el papel de las micro, pequeñas y medianas empresas en la transición energética. Este capítulo resalta la necesidad de desarrollar políticas públicas que fomenten la gestión energética y la adopción de energías renovables en este sector clave para las economías locales.

El cuarto capítulo, “Edificios inteligentes: el papel de la IA en la transición energética y en el cambio de conducta del ciudadano”, aborda el impacto de la inteligencia artificial en la gestión energética de edificios y su influencia en el comportamiento de los usuarios. Este capítulo destaca cómo la digitalización puede optimizar el consumo energético y promover un uso más consciente de los recursos.

El quinto capítulo, “Transición energética en la industria automotriz”. Se enfoca en la industria automotriz, un sector emblemático de la economía global. En él, se analiza la transformación hacia vehículos eléctricos e híbridos, así como los retos asociados con la infraestructura de carga y la sostenibilidad de las cadenas de suministro.

En el sexto capítulo, “Calentamiento de agua en albercas con energía solar térmica: una alternativa para obtener energía asequible y no contaminante”, se presenta un análisis práctico sobre el uso de energía solar térmica. Este capítulo destaca cómo estas soluciones pueden reducir los costos energéticos y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

En el capítulo siete se aborda el diseño bioclimático; “Diseño bioclimático: análisis bibliométrico”. Aquí se analiza la evolución de esta disciplina, que busca integrar principios de sostenibilidad en la arquitectura para reducir el impacto ambiental de las construcciones.

El octavo capítulo, “El enfoque del discurso humanismo mexicano a discusión en la política ambiental y energética de México 2025-2030”, examina el papel del discurso político y filosófico en la formulación de políticas energéticas. Este análisis ofrece una perspectiva crítica sobre las implicaciones de las decisiones gubernamentales en el contexto mexicano.

En noveno capítulo, “Concentradores solares luminiscentes. Prospec-tiva en el sector energético a corto, mediano y largo plazo”, se exploran innovaciones tecnológicas que prometen revolucionar el sector energético. Este capítulo enfatiza el potencial de los concentradores solares para diversificar las opciones de generación renovable.

El décimo capítulo, “Los puntos cuánticos y la energía renovable”, introduce al lector en el fascinante mundo de la nanotecnología, destacando cómo los avances en este campo pueden impulsar la eficiencia y la sostenibilidad de las fuentes renovables.

En el capítulo once, “Uso de residuos de plástico para producción de energía y de otros productos químicos de alto valor”, se presenta una solución innovadora para abordar el problema de los residuos plásticos. Este enfoque destaca cómo la economía circular puede integrarse en la transición energética.

El capítulo doce, “Diodos orgánicos emisores de luz (OLED) Basados en el polímero conductor poli (3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT)”, explora aplicaciones avanzadas en iluminación y su impacto en la eficiencia energética. Este capítulo subraya el papel de los materiales avanzados en la transformación del sector energético.

Finalmente, el capítulo trece, “Análisis exergético no estacionario de un calentador solar de aire de placa plana con diferentes rugosidades en el absorbedor”, ofrece un estudio detallado sobre el desempeño de tecnologías solares, destacando su potencial para maximizar la eficiencia en sistemas de calefacción.

En conjunto, este libro proporciona una plataforma para el intercambio de conocimientos, reflexiones y propuestas que promuevan una transición energética en los países en desarrollo inclusiva y sostenible. Al explorar temas que van desde tecnologías de generación emergentes y sistemas eficientes, hasta consideraciones políticas y sociales, *Energías Renovables: Generación, Distribución, Almacenamiento y su Impacto en los Países en Desarrollo*, se convierte en una referencia esencial para investigadores, tomadores de decisiones y todos aquellos interesados en construir un futuro energético más limpio y equitativo. Los editores y autores que han contribuido a esta obra esperan que inspire a sus lectores en la búsqueda de soluciones prácticas, fomente el diálogo interdiscipli-

nario y, sobre todo, motive acciones concretas para enfrentar los retos energéticos de nuestra época, y así construyamos juntos las bases para un desarrollo sostenible.

*Dr. Alberto Coronado Mendoza
Director del Instituto de Energías Renovables
Centro Universitario de Tonalá
Universidad de Guadalajara*

*Dra. Belkis Sulbarán Rangel
Coordinadora de la maestría en Ciencias en Ingeniería del Agua y la
Energía
Centro Universitario de Tonalá
Universidad de Guadalajara*



Capítulo 1

Energía renovable y desafíos para una transición energética justa e inclusiva: el contexto energético de Honduras

Miguel Ángel Figueroa Rivera¹

miguel.figueroa@unah.edu.hn

Jorge Alfredo Cárcamo Ardón²

jorgecarcamo@sen.hn

Jair Isaac Nazar Alfaro²

jairnazar@sen.hn

Roberto Alfonso Zapata Quiroz²

robertozapata@sen.hn

Marco Antonio Flores Barahona³

marco.flores@unah.edu.hn

<https://doi.org/10.61728/AE20251956>



¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional Autónoma de Honduras

² Secretaría de Energía (SEN)

³ Instituto de Investigación en Energía (IIE). Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Resumen

Se presenta el panorama energético de Honduras y los desafíos para una transición justa e inclusiva procurando una alta participación de fuentes de energía renovable. A partir de los datos del Balance Energético Nacional, se muestra la realidad energética actual del país, donde la leña sigue siendo la principal fuente de energía. El documento también expone el compromiso de Honduras en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, y cómo la transición energética puede contribuir a cumplir con estos objetivos. Respecto a la oferta de electricidad, el subsector eléctrico ha pasado por varias reformas legales pero los planes destacan la necesidad de diversificar la matriz de generación eléctrica y reducir la dependencia de fuentes fósiles. Como parte de este contexto de transición energética se muestran los planes de expansión de la generación y transmisión con la necesidad de un enfoque de flexibilidad de los sistemas eléctricos, proponiendo escenarios de descarbonización. En contraste con una avanzada integración eléctrica regional se expone la problemática del acceso universal a la electricidad en la región, presentando la situación de la cobertura eléctrica en Honduras. Se discuten las políticas y estrategias necesarias para una transición energética justa con inclusión social, siendo instrumentos de reducción de la pobreza y considerando el acceso universal a la energía eléctrica como un derecho humano y no solo un bien comercial. Se concluye acerca de la necesidad de una planificación energética integral que considere los aspectos sociales, económicos y ambientales para garantizar una transición energética que sea sostenible, participativa, justa e inclusiva, contribuyendo al desarrollo sostenible del país de forma exitosa.

Introducción

Honduras, al igual que muchos países en desarrollo, enfrenta el desafío de asegurar un acceso confiable y sostenible a la energía mientras y a su vez buscando un crecimiento económico inclusivo. A partir del balance energético nacional el contexto energético de Honduras presenta una dependencia de fuentes de energía a base de combustibles fósiles en su matriz energética así como la evolución de la participación de fuentes de energía renovable de acuerdo con el potencial del país. Dentro de la oferta energética la leña sigue siendo una importante fuente de energía principalmente en el sector de consumo residencial. La transición hacia fuentes de energía con recursos renovables (solar, eólico, hídrico, geotermia, biomasa), la eficiencia energética, la electromovilidad, etc., se presenta como una solución crucial para mitigar y contribuir a los objetivos globales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como parte de compromisos de ambición climática.

Como es usual en los procesos de transición energética, surgen desafíos que podrían incluir la falta de infraestructura, la limitada capacidad financiera, la falta de acceso a la tecnología y la necesidad de políticas públicas que reduzcan las brechas y protejan los derechos a las poblaciones vulnerables.

Una transición energética justa requiere que los beneficios derivados se compartan equitativamente entre todos los sectores de la sociedad. Se debe asegurar que la transición energética no agrave las desigualdades existentes, sino que, por el contrario, contribuya a reducir la pobreza energética y a mejorar la calidad de vida para las poblaciones marginadas. Esto debe incluir la consideración de políticas de apoyo y participación de las comunidades rurales, la creación de modelos de desarrollo económico alternativos para crear oportunidades locales y la promoción de una verdadera participación comunitaria y ciudadana en el proceso de transición.

Se busca contribuir a mantener un debate sobre las políticas, estrategias y acciones necesarias para asegurar un futuro energético sostenible y equitativo para el país, así para poder hablar con toda propiedad de una transición energética no solo viable o factible en el ámbito técnico o económico, sino realmente de un proceso justo, inclusivo, participativo y sostenible, sin dejar a nadie atrás, y sobre todo de estricto respeto a las

diferentes cosmovisiones de las comunidades en el marco de los derechos humanos fundamentales.

Contexto energético de Honduras

Honduras, al igual que diversos países en el mundo, enfrenta una situación crítica debido a los efectos adversos del cambio climático, tales como una mayor frecuencia de huracanes, sequías e inundaciones. Estos efectos han tenido consecuencias negativas en la economía y sociedad hondureña.

En vista de esta situación, Honduras, similar a todos los países que forman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), ha enfrentado una lucha, desde diversos frentes, contra el cambio climático. Esta lucha se centra, principalmente en mitigar la emisión de gases de efecto invernadero y en adaptarse a los efectos adversos de la variabilidad y el cambio climático.

En cuanto al frente de la mitigación, Honduras ha identificado que el segundo mayor emisor de gases de efecto invernadero es el sector energético, con un 17 % del total de emisiones nacionales (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, 2024a). Incluso, las actividades relacionadas con transporte y generación de electricidad son consideradas como categorías clave a nivel nacional (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, 2024b).

Estas categorías clave son congruentes con el inventario de gases de efecto invernadero del sector energético, en donde se evidencia que los sectores de generación de electricidad y transporte representan $\approx$ 89 % del total de emisiones del sector energía (Figura 1) (Secretaría de Energía, 2024d).

Además, durante el 2024, Honduras inició un proceso de actualización de su prospectiva energética, en el que se construyen una serie de escenarios energéticos-económicos-ambientales. Este proceso considera diversos elementos que permite orientar el desarrollo integrado, holístico y sostenible del sector energía. En esta prospectiva se evidencia que, de no implementar medidas urgentes de mitigación, las emisiones del sector se triplicarían para el 2050, poniendo en riesgo el cumplimiento de las metas nacionales ratificadas por el país (Figura 2) (Secretaría de Energía, 2024e).

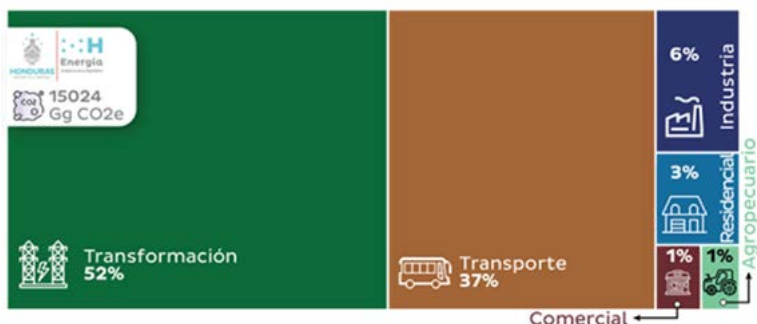


Figura 1. Emisiones de gases de efecto invernadero según sector de consumo en el 2023 (Secretaría de Energía, 2024e)

Las emisiones del sector energético provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles y de biomasa (Figura 3). Aunque las emisiones provenientes de biomasa son consideradas carbono neutro, los gases no CO₂ (metano y óxidos nitrosos, entre otros gases) constituyen una fuente relevante de gases de efecto invernadero y de incertidumbre en el cálculo de los inventarios nacionales (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, 2024a). Asimismo, el consumo de esta biomasa tiene repercusiones tales como la deforestación, degradación forestal y enfermedades respiratorias y cardiovasculares, entre otras.



Figura 2. Proyecciones de emisiones de CO₂ del sector energía al 2050 en escenario tendencial (Secretaría de Energía, 2024d)

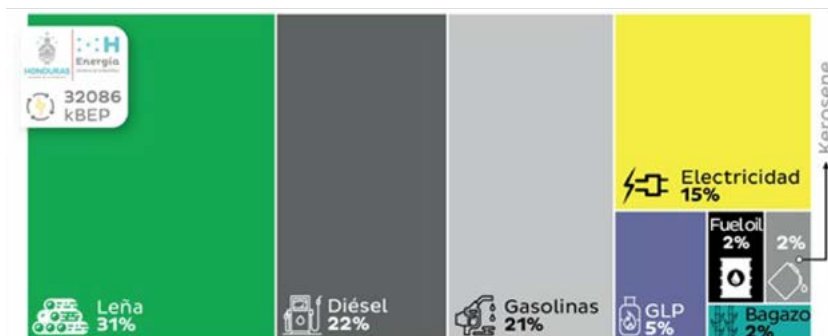


Figura 3. Consumo energético según fuente en Honduras durante el 2023 (Secretaría de Energía, 2024e)

En vista de la importancia del sector energético y su contribución a la mitigación del cambio climático, a través de la Contribución Nacional Determinada (NDC, por sus siglas en inglés) se describen una serie de objetivos y metas con el propósito de reducir las emisiones de este sector. Entre estos objetivos se destacan la promoción de la generación eléctrica renovable, el fortalecimiento de la eficiencia energética, la movilidad eléctrica y la bioenergía como estrategias para reducir las emisiones (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, 2021).

En cuanto a la eficiencia energética y a la electromovilidad, Honduras está trabajando en fortalecer el marco normativo y jurídico que permita crear las condiciones habilitantes, incentivando así el uso y adopción continua de equipos más modernos y eficientes en todos los sectores de consumo energético del país. Es importante destacar que, a partir de 2024, Honduras ya cuenta con el marco jurídico para promover la eficiencia energética y la autoproducción de energía, aspectos que contribuirán en la mitigación del cambio climático.

Con respecto a la bioenergía, el principal enfoque es en reducir el consumo de leña en el ámbito nacional. Este enfoque se debe a que en Honduras el consumo de leña representa el 31 % del total de la energía consumida en el país. Ante esta situación, la NDC establece una meta de reducción del 39 % de leña domiciliar a nivel nacional (Secretaría de Energía, 2024b; Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, 2021).

El alto consumo de leña obedece a la facilidad de su obtención, particularmente en zonas rurales, donde el recurso es ampliamente disponible. Esta situación se ve exacerbada debido al deficiente acceso a otras fuentes de energía más modernas y limpias.

Por lo tanto, para cumplir con las metas establecidas, una de las estrategias propuestas es una segmentación geográfica, en la cual, para zonas urbanas y periurbanas, se propone la eliminación del consumo de leña, favoreciendo a fuentes de energía más modernas, eficientes y limpias. Complementariamente, en zonas rurales se propone el uso y adopción de estufas eficientes como una tecnología mejorada que reduce el consumo de este energético (Cortés et al., 2020).

En cuanto a la meta de energía eléctrica renovable, Honduras busca reducir su dependencia de combustibles fósiles en pro de una transición energética orientada hacia una matriz energética más renovable y no emisora de gases de efecto invernadero. En especial, Honduras se enfoca en fortalecer la generación hidroeléctrica, eólica, geotérmica, solar, con biomasa y combustibles menos contaminantes como el gas natural, con lo que se diversifica la matriz de generación eléctrica (Centro Nacional de Despacho (CND)/ ENEE, 2024b).

Con el aumento de la generación renovable, es necesario invertir en capacidad instalada renovable, por lo que Honduras está desarrollando esta inversión desde dos aristas complementarias. Por una parte, la construcción de grandes proyectos de generación con fuentes renovables, tales como El Tablón, Llanitos y Jicatuyo, son algunos de los ejemplos de grandes inversiones en infraestructura renovable a desarrollar por el Estado. Por otra parte, también se están haciendo diversos esfuerzos para el desarrollo de microrredes y pequeños sistemas aislados que son alimentados con recursos renovables nacionales.

Las microrredes y sistemas aislados tienen como principal propósito proveer acceso a electricidad a comunidades remotas que aún no tienen ningún tipo de acceso a este recurso. Aunque el principal objetivo es proveer acceso a electricidad, estas iniciativas también tienen un efecto importante sobre la mitigación del cambio climático, ya que en dichas comunidades se consumen principalmente leña, kerosene y gasolina. Este consumo y las emisiones correspondientes toman especial relevancia al

considerar que aproximadamente el 12 % de los hondureños no tienen acceso a la electricidad (Secretaría de Energía, 2024b).

Subsector electricidad y planes de diversificación de la matriz de generación de energía eléctrica con objetivos de transición energética

Organización del sector energético nacional y gobernanza en el subsector electricidad

La institucionalidad del sector energético y estructura del subsector eléctrico de Honduras en las últimas décadas ha sido un proceso que ha tenido diferentes fases de transformación y reformas en cuanto a la estructura de funcionamiento y dinámica de mercado eléctrico.

En 1957, el Gobierno de Honduras creó la Empresa Nacional de Energía Eléctrica (ENEE) como una entidad pública encargada de la generación, transmisión y distribución de electricidad. A lo largo de los años, se llevaron a cabo tres reformas significativas. La primera, en 1994, permitió la participación de productores privados en la venta de electricidad a la ENEE, así mismo en la comercialización de la electricidad con la figura de Grandes Consumidores. La segunda reforma, en 2014, introdujo la Ley General de la Industria Eléctrica, que liberalizó la producción de electricidad y creó un modelo de mercado mayorista, aunque la transmisión y distribución permanecieron como monopolios regulados (Congreso Nacional de la República de Honduras, 2014). Esta reforma también estableció la creación de Secretaría de Estado en el Despacho de Energía (SEN) como ente rector, junto con un regulador independiente (CREE: Comisión Reguladora de Energía Eléctrica, www.cree.gob.hn) y un operador del sistema y de mercado (ODS), formalizando así la estructura institucional del sector eléctrico en Honduras (Pagoaga, J. O. N., Y Figueroa, M. A, 2017).

Por último, y como tercera reforma vigente, en 2022 se promulga la “Ley Especial para garantizar y declarar el servicio de la energía eléctrica como un bien público de seguridad nacional y un derecho humano de

naturaleza económica y social”, Decreto Legislativo No. 46-2022, cuyo espíritu en esencia es el compromiso impostergable de garantizar al pueblo hondureño el servicio de energía eléctrica como un bien público de seguridad nacional, bajo responsabilidad de la ENEE, defendiendo y fortaleciendo la naturaleza pública de la empresa eléctrica estatal y su participación en un entorno de mercado. Básicamente, esta reforma energética establece que la electricidad y su acceso universal son un servicio público básico y esencial como derecho humano y no solo como un bien de mercado, enmarcando en el espíritu esencial de la ley la recuperación de la soberanía de los recursos energéticos del país (Congreso Nacional de la República de Honduras, 2022).

Matriz de generación de electricidad

De acuerdo con los datos del Informe Estadístico Anual del Subsector Eléctrico (IEASEN) (Secretaría de Energía, 2024c), en Honduras la potencia eléctrica instalada en 2023 fue de 3086.67 MW, distribuida en aproximadamente 108 centrales generadoras, donde 1,152.20 MW (37.33 %) instalados son de generadores a base de combustibles fósiles (bunker y diésel) tales como motores de combustión interna (MCI) y algunas plantas de carbón-coque; 1934.47 MW (62.67 %) corresponden a potencia instalada de generación renovable (hidroeléctrica, solar fotovoltaica, eólica, biomasa, geotermia).

El mayor porcentaje de la generación de energía eléctrica para el año 2023 fue a base de combustibles fósiles, con un total de 40.61 % (4712.79 GWh), seguido por generación hidroeléctrica con un 27.64 % (3208.08 GWh) del total de la matriz de generación en el país. Para el año 2023, el 52.45 % de la generación fue a base de fuentes de energía renovable y un 39.90 %, mediante fuentes no renovables.

Dentro de la matriz de potencia eléctrica renovable instalada, el mayor número de centrales son de tecnología hidráulica, esto debido al gran potencial hídrico del país; sin embargo, también existe una cantidad importante de plantas solares fotovoltaicas (PV) situadas en el sur del país debido al potencial de recurso solar que existe en la zona.

Cabe notar que el 81.92 % de la generación de energía eléctrica en Honduras proviene de empresas del sector privado; el 18.08 % de la generación es de plantas estatales hidroeléctricas y térmicas de la empresa generadora ENEE-Generación.

Tabla 1. Potencia eléctrica instalada en Honduras al 2023.

Fuente: (Centro Nacional de Despacho (CND)/ ENEE, 2023a), <https://cnd.enee.hn/>

Tecnología de generación	Capacidad (MW)	Porcentaje	No. de plantas o centrales
Fósil	1047.2	33.93 %	20
Hidroeléctrica	916.34	29.69 %	51
Solar (PV)	510.51	16.54 %	17
Eólica	237.8	7.70 %	3
Biomasa	219.82	7.12 %	15
Geotérmica	50	1.62 %	1
Carbón	105	3.40 %	1
Total	3086.67	100	108

Estudios de expansión y diversificación de la matriz de generación de energía eléctrica con criterios de flexibilidad, considerando objetivos y metas de política energética

Dentro de los retos de la transición energética, la expansión de la infraestructura eléctrica desde el punto de vista de generación y transmisión persigue el objetivo de abastecer la demanda de energía eléctrica considerando criterios técnicos, ambientales, sociales y económicos-financieros, con el fin de que estas aristas armonicen, buscando un punto óptimo que ofrezca seguridad, confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad al mínimo costo para la demanda.

Por mandato de ley, el Centro Nacional de Despacho (CND) de ENEE en su condición de ente operador y administrador del mercado eléctrico nacional, elabora el Plan Indicativo de Expansión de la Generación (PIEG) con una función objetivo de minimizar el costo de suministrar la demanda eléctrica nacional en el largo plazo, sujeto a las restricciones propias de las diferentes tecnologías de generación, lo anterior con una

periodicidad de cada dos (2) años y un horizonte de diez (10) años de estudio. El PIEG 2024-2033 propone escenarios de inversión en generación que superan los 2,600 millones de dólares (USD) (Centro Nacional de Despacho (CND)/ ENEE, 2023b).

No obstante desde el punto de vista de la política energética y medidas de transición energética, se elabora una planificación con un horizonte de más largo plazo a 2050, la Secretaría de Energía (SEN) desarrolla diversos estudios de escenarios prospectivos de expansión de generación y transmisión buscando alcanzar metas y objetivos de política energética e incorporando indicadores de flexibilidad en sistemas de suministro de energía eléctrica, se consideran en este análisis metas de porcentajes de renovabilidad, reducción de emisiones (CO₂), vertimientos (curtailment) mínimos de energía renovable variable (ERV), reducción de pérdida de carga, incluyendo también sistemas de almacenamiento de energía de gran escala como ser baterías y la incorporación de tecnologías de generación como el gas natural entre otros. La línea base de estos estudios prospectivos es el PIEG elaborado por el operador del sistema (CND), como se indicó antes (Secretaría de Energía, 2024a).

La metodología utilizada por parte de la SEN para desarrollar estos “Estudios de expansión y diversificación de la matriz de generación de energía eléctrica con criterios de flexibilidad, considerando objetivos y metas de política energética” se basa principalmente en el uso de herramientas computacionales (software) para planificación eléctrica de largo plazo, como ser el SimSEE, el cual es de uso libre y utilizado por el ente operador del sistema de Uruguay (referencias), y adicionalmente se utiliza la herramienta computacional FlexTool, desarrollada por la Agencia Internacional de las Energías Renovables (o por sus siglas en inglés IRENA).

SimSEE es una aplicación informática de código abierto desarrollada por el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República Oriental del Uruguay. Permite construir simulaciones del funcionamiento óptimo de sistemas de generación eléctrica, siendo aplicable tanto en el largo plazo (estudios de planificación de inversiones) como en el medio y corto plazo (programación del funcionamiento óptimo del sistema) (Chaer, R., 2008). Esta herramienta permite simular la operación futura

del sistema incorporando distintos tipos de pronósticos, como ser generación con fuentes de energía renovable, demanda eléctrica, precios futuros de tecnologías y combustibles, intercambios internacionales, etcétera.

IRENA define el concepto de flexibilidad como “la capacidad de un sistema eléctrico para hacer frente a la variabilidad e incertidumbre que la generación de ERV introduce en el sistema en diferentes escalas de tiempo, desde el muy corto hasta el largo plazo, evitando el vertido de ERV y suministrando de manera confiable toda la energía demandada por el cliente” (IRENA, 2018).

FlexTool fue desarrollado por IRENA como una herramienta computacional para evaluar la flexibilidad de un sistema de generación de energía eléctrica (IRENA, 2018). Se trata de una herramienta de optimización de programación lineal que utiliza un modelo determinista. La red de transmisión interna se representa simplemente mediante un problema de transporte. En el modo de expansión de la inversión, que normalmente se realiza durante un período de 30 años o más, se aplica una resolución más baja donde se utilizan semanas representativas para cada año en la simulación. Luego se realiza un despacho de operaciones con una resolución horaria o de menor duración para capturar los requisitos de flexibilidad en años críticos. La herramienta no estudia temas relacionados con el muy corto plazo (escala de segundo/subsegundo), como para estudios dinámicos, lo cual es una limitante considerando los escenarios con fuentes de ERV.

Para el caso de Honduras, en el largo plazo a 2038 existe una visión de país que establece como meta superar un 80 % de participación de fuentes de generación con energía renovable y, en una prospectiva de transición energética a 2050, una alta penetración de las tecnologías de energía renovable variable (ERV) tales como el solar fotovoltaico (PV) y eólico; también, de forma importante, la generación eléctrica con recursos hídricos (de tipo embalse) y de fuentes de generación renovable a base de recursos geotérmicos y biomasa. De forma estratégica, la incorporación del gas natural como tecnología “puente” o de “transición” con el objetivo de reducir costos, emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia en comparación con tecnologías térmicas tradicionales que utilizan el bunker, diésel o carbón, procurando en esta dirección una oferta de matriz de generación eléctrica diversificada, firme, eficiente y más limpia.

En esta visión de largo plazo se integran en los escenarios de planificación los sistemas de almacenamiento de gran escala, como son baterías eléctricas (BESS: Battery energy storage systems), tanto de forma independiente como en conjunto con las nuevas plantas solares (fotovoltaicas) y eólicas que se incorporen al parque de generación. Para las nuevas plantas solares que ingresen al parque de generación, se ha recomendado una medida que busca asegurar que exista una capacidad de almacenamiento (baterías) del 20 % de su capacidad instalada total y, para el caso de los parques eólicos, un 10 % de su capacidad instalada total.

Sin embargo, todo lo anterior no tiene una funcionalidad relevante para la flexibilidad si no se realizan las adiciones de inversiones en nuevas líneas de transmisión o repotenciación de las existentes con el fin de gestionar toda la potencia y energía que se espera adicionar en el largo plazo. De conformidad con el plan de expansión de la red de transmisión (PERT) 2024-2033, las inversiones en transmisión superan los 700 millones de dólares, lo que representa un desafío significativo en la gestión de financiamiento para cumplir estos objetivos de transición energética (Centro Nacional de Despacho (CND)/ENEE, 2023c).

En la Figura 4 se muestra de forma prospectiva a 2050 algunos resultados de las simulaciones realizadas en cuanto a la composición de la matriz de generación según las adiciones de potencia previstas en el largo plazo con el fin de buscar un índice de renovabilidad arriba del 70 % después de 2030. Resultado de las simulaciones en SimSEE, al categorizar diversos escenarios prospectivos a 2050, existe un beneficio en la reducción de emisiones de CO₂ (Figura 5) al incorporar fuentes renovables en la matriz de generación pero en paralelo con las inversiones en la infraestructura de transmisión, y aun mas si se implementan medidas de eficiencia energética desde el lado de la demanda (Secretaría de Energía, 2024a).

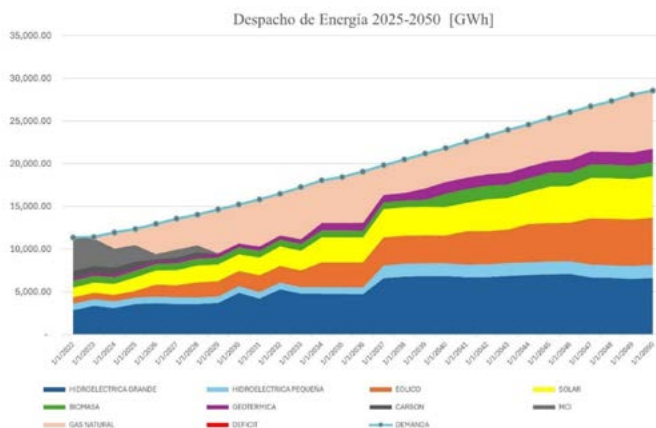


Figura 4. Escenario de despacho de energía eléctrica (GWh) por tecnología período 2025-2050 (Secretaría de Energía, 2024a)

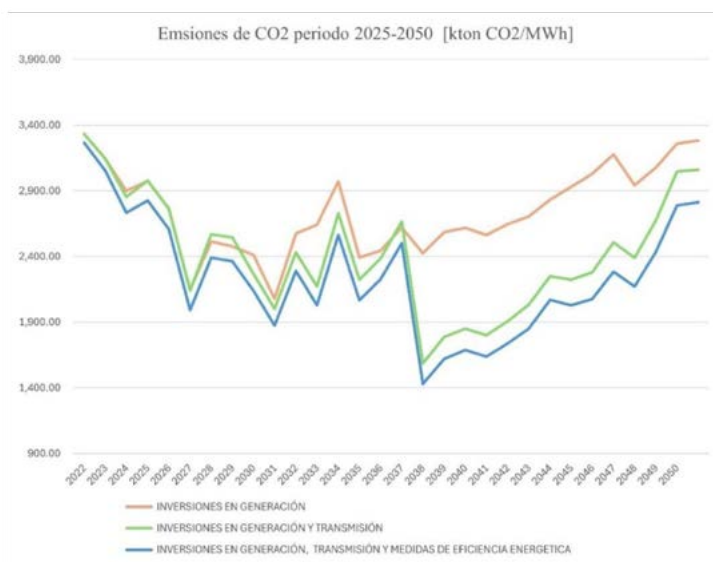


Figura 5. Emisiones de CO₂ por tipo de escenario de inversión prospectivo a 2050. (Secretaría de Energía, 2024a).

Por otro lado, resultados obtenidos de la herramienta FlexTool indican que los parques de generación solar/eólico que integran baterías propias

ayudan a reducir en energía los vertimientos y la pérdida de carga durante el día, ubicando bloques de potencia y energía en horas críticas del pico de demanda durante la noche.

Pero no basta solo con sistemas de almacenamiento de forma conjunta en parques solares y eólicos, sino que es necesaria la incorporación de baterías de forma independiente que se alimenten del sistema de tal forma que se optimice el despacho durante el día y la noche; las baterías independientes de gran escala tienen un mayor efecto de aportar flexibilidad al sistema eléctrico de potencia al disminuir de una mejor manera los picos de déficit y de vertimiento de ERV (Secretaría de Energía, 2024a).

La reducción de la demanda de energía eléctrica mediante medidas de eficiencia energética tiene un efecto positivo en cuanto a la reducción de costos y aprovechamiento de energía renovable, también en la reducción de pérdida de carga para cada escenario de flexibilidad. Este enfoque, sin embargo, presenta un desafío: la disminución de la demanda pico que puede llevar a un mayor vertido de energía renovable. Por tanto, para aprovechar al máximo la energía generada y evitar pérdida de carga, se justifica la implementación de sistemas de almacenamiento de energía.

Integración energética regional

En el marco del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), entre 1997 y 1998 los países de la región iniciaron un proceso gradual de integración eléctrica. Este proceso se basa en la creación de un mercado eléctrico regional competitivo, la interconexión de sus redes nacionales a través de nuevas líneas de transmisión, y el fomento de proyectos de generación a escala regional. Como resultado de esta iniciativa, seis países centroamericanos (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá) firmaron un Tratado Marco para el desarrollo del Sistema de Interconexión Eléctrica de los Países de América Central (SIEPAC) (Figura 6). El diseño del MER se basa en la integración de los sistemas eléctricos nacionales, manteniendo un conjunto de reglas específicas para las transacciones en la Red de Transmisión Regional (RTR) (EOR, 2024). Los puntos de interconexión en la RTR se definen como las fronteras entre los mercados nacionales y el mercado regio-

nal. El proyecto SIEPAC se concibió como parte fundamental de esta iniciativa de integración.

La infraestructura de transmisión regional gestionada por la Empresa Propietaria de la Red (EPR) consta de alrededor de 1,800 kilómetros de líneas de 230 kV con diseño para la futura expansión a doble circuito. La inversión de la línea de interconexión regional con capacidad de transporte de 300 MW supera los 495 millones de dólares.

La capacidad de generación disponible en los países del MER en el segundo semestre de 2024, de acuerdo con la información remitida por los operadores nacionales (OS/OM) es de 17,619.2 MW (EOR, 2024), de los cuales el 39.8 % corresponde a centrales hidroeléctricas, 32.5 % a termoeléctricas, 9.1 % a centrales solares fotovoltaicas, 7.5 % a centrales eólicas, 7.6 % a centrales de biomasa, 3.2 % a centrales geotérmicas y 0.3 % a generación distribuida. El porcentaje total de producción de energía a partir de fuentes renovables en América Central es del 67.5 %.



Figura 6. Línea SIEPAC del Mercado Eléctrico Regional (MER). Comisión Regional de Interconexión Eléctrica (CRIE), <https://crie.org.gt/mer/>

Como se puede notar en la Tabla 2, si bien Centroamérica cuenta con una importante infraestructura eléctrica regional, aún existen brechas significativas en el acceso a la electricidad, particularmente en Honduras y Guatemala, que presentan bajos índices de acceso y cobertura.

Para alcanzar las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (ODS 7) “energía asequible y no contaminante”, asegurar el acceso universal a una energía sostenible y moderna, se necesitan esfuerzos adicionales a nivel local en la formulación de políticas energéticas, con el fin de mejorar las condiciones de vida de la población.

Tabla 2. Indicadores de acceso a electricidad en los países de América Central, año 2022.

Fuente: Torijano, E. (2023)

País	Índice de Acceso a Electricidad (IAE) %
Costa Rica	99.4
Nicaragua	99.3
El Salvador	98.6
Panamá	94.9
Guatemala	92.62
Honduras	87.5

Situación de cobertura y acceso a electricidad en Honduras

Se ha determinado que el índice de cobertura eléctrica (ICE) al finalizar el año 2023 es de 86.28 %, sobre un total aproximado de 2 175 856 viviendas ocupadas en todo el país. El departamento de Gracias a Dios presenta la menor cobertura en el país, con un 16.43 %. El ICE únicamente considera acceso al servicio eléctrico mediante redes de distribución de las empresas distribuidoras (Secretaría de Energía, 2024b). Por otra parte, ha resultado que el índice de acceso a electricidad (IAE) en el ámbito nacional es de 88.20 %, donde nuevamente es el departamento de Gracias a Dios el más afectado, ya que únicamente el 31.31 % de las viviendas identificadas cuentan con acceso al servicio de la electricidad. Con estos datos, Honduras se ubica como el penúltimo país después de Haití con bajos indicadores de acceso a energía.

Se ha utilizado una metodología basada en el análisis de información geoespacial, mediante una plataforma informática basada en el sistema de información geográfica libre y de código abierto (QGIS). Esta plata-

forma fue diseñada como herramienta de trabajo para el Plan Estratégico de Acceso Universal a la Electricidad (PEAUE) con apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y colaboración técnica del Fondo Social de Desarrollo Eléctrico (FOSODE) de la ENEE. Entre las principales variables en el cálculo de indicadores ICE e IAE, se encuentran el número de clientes reportados por las empresas de distribución, el número de viviendas electrificadas no conectadas a red, techos sin electricidad identificados en el análisis de información geoespacial, además de información estadística y demográfica del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y otras instituciones. Los análisis desarrollados para cobertura y acceso han sido desagregados a nivel de departamentos, municipios y aldeas (Secretaría de Energía, 2024b).

Un dato adicional del año 2023 refleja que, de 1591 establecimientos de salud, 1407 cuentan con acceso a electricidad, generando un IAE para establecimientos de salud de 88.43 %. Mientras que en el análisis de los centros educativos reportados en el año 2023 por Secretaría de Educación refleja que, 12 124 centros cuentan con energía o acceso a la electricidad, generando un IAE para Centros Educativos de 71.03 %.

Políticas y estrategias para acceso universal a la electricidad

La Secretaría de Energía de Honduras con el objetivo primordial de alcanzar el acceso universal a la electricidad ha promulgado diferentes estrategias en fase de implementación, entre estas se encuentran la Política de Acceso Universal a la Electricidad para Honduras (PAUEH) decreto ejecutivo PCM 120-2021, el Anteproyecto de Ley para Electrificación Social en Honduras (LESH), el Plan Estratégico de Acceso Universal a la Electricidad (PEAUE), el Plan de Acceso Universal a la Electricidad para Centros Educativos y Establecimientos de Salud (PAUECEES) y el Programa de Autosostenibilidad Mediante Usos Productivos de la Electricidad (PAMUPE) (Secretaría de Energía, 2024b).

Mediante el PEAUE a partir de datos georreferenciados de las redes de distribución, se proponen diferentes alternativas para proveer acceso a electricidad a comunidades más remotas, minimizando los costos, estos pueden ser la misma extensión de la red eléctrica, o sistemas ais-

lados como microrredes con energía renovable y sistemas domiciliarios independientes.

No obstante, en 2022 con la promulgación de la reforma energética, “Ley Especial para garantizar y declarar el servicio de la energía eléctrica como un bien Público de seguridad nacional y un derecho humano de naturaleza económica y social”, esta ley establece que la ENEE debe implementar un programa de electrificación rural masiva a través del Fondo Social de Desarrollo Eléctrico (FOSODE), utilizando tecnología solar/híbrida, priorizando las comunidades de grupos indígenas y afrodescendientes, esto último implica realizar rigurosamente las acciones necesarias para cumplir el derecho de los pueblos originarios a la consulta libre, previa e informada así como lo establece el Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT).

Conclusiones

Honduras presenta una alta dependencia de la leña como fuente primaria de energía, lo que evidencia una desigualdad en el acceso a la energía moderna y sus implicaciones negativas para la salud y el ambiente. La transición energética debe priorizar la inclusión y el acceso equitativo a fuentes de energía no contaminante y asequible para todas las poblaciones.

La diversificación de la matriz energética es crucial para reducir la vulnerabilidad de Honduras a las fluctuaciones de los precios de los combustibles fósiles y para cumplir con los compromisos internacionales de reducción de emisiones. Esto requiere una planificación energética a largo plazo con enfoque de flexibilidad que considere las diferentes tecnologías de generación renovable, los sistemas de almacenamiento, la inversión en infraestructura de transmisión, eficiencia energética, la electrificación de otros sectores y la integración regional. Para esto se requiere de novedosas y potentes herramientas computacionales con modelos dinámicos que faciliten el análisis de escenarios complejos de simulación con muchas variables que implica la transición energética.

Una transición energética exitosa en Honduras debe ser justa e inclusiva, considerando implementar políticas energéticas, estrategias y acciones para reducir de forma pragmática las brechas de acceso a energía moderna, asequible y no contaminante en las zonas más remotas

y vulnerables e involucrando de forma activa a las comunidades en el estricto respeto de sus cosmovisiones, y es esta la ruta que se ha tomado en su reforma energética más reciente declarando el acceso a la energía eléctrica como un derecho humano.

Referencias

- Centro Nacional de Despacho (CND)/ ENEE. (2024a), *Informe Mensual de Operación del Mercado y Sistema Eléctrico Nacional Año 2023*. Disponible en: <https://cnd.enee.hn/informe-de-operacion-mensual/>
- Centro Nacional de Despacho (CND)/ ENEE. (2024b), *Plan Indicativo de la Expansión de la Generación 2024-2023*. Disponible en: <https://cnd.enee.hn/pieg-y-pet-2024-2023/>
- Centro Nacional de Despacho (CND)/ ENEE. (2024c), *Plan de la Expansión de la Red de Transmisión 2024-2023*. Disponible en: <https://cnd.enee.hn/pieg-y-pet-2024-2023/>
- Chaer, R. (2008). *Simulación de sistemas de energía eléctrica*. Instituto de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la República, Uruguay. Recuperado en: https://simsee.org/db-docs/Docs_propiedades/nid_11/tesischaer.pdf
- Congreso Nacional de la República de Honduras. (2014). *Ley General de la Industria Eléctrica*. “La Gaceta”.
- Congreso Nacional de la República de Honduras. (2022). *Ley Especial para Garantizar el Servicio de la Energía Eléctrica como un Bien Público de Seguridad Nacional y un Derecho Humano de Naturaleza Económica y Social*. “La Gaceta”.
- Cortés, V., Tercero, J. F., Valladares, M., & Rodriguez, N. (2020). *Estrategia Nacional para la Adopción de Estufas Mejoradas*. Recuperado de: <https://icf.gob.hn>
- Ente Operador Regional del Mercado Eléctrico de América Central (EOR). (2024). *Planeamiento operativo de América Central 2024-2025*. Disponible en: https://www.enteoperador.org/historico-de-informes-de-planeamiento-operativo/#elf_11_Lw
- IRENA (2018), *Power System Flexibility for the Energy Transition*, Part 1: Overview for policy makers, International Renewable Energy Agency,

- Abu Dhabi. Recuperado de: www.irena.org/publications
- Pagoaga, J. O. N., & Figueroa, M. A. (2017). *Liberalization of the honduran electricity market: A review of the current process*. 2017 IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII), 1–5. <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2017.8278538>
- Secretaría de Energía. (2024a). *Estudios de escenarios de planificación de expansión de sistemas de generación y redes eléctricas con objetivos de política energética (2025-2050)*.
- Secretaría de Energía. (2024b). *Informe de Cobertura y Acceso a la Electricidad-Datos a diciembre 2023*. Disponible en: <https://sen.hn/direccion-general-de-electricidad-y-mercados/>
- Secretaría de Energía. (2024c). *Informe Estadístico del Subsector Eléctrico Nacional 2023*. Disponible en: <https://sen.hn/direccion-general-de-electricidad-y-mercados/>
- Secretaría de Energía. (2024d). *Actualización de la Prospectiva Energética de Honduras 2022 - 2050*. Disponible en: <https://sen.hn/prospectiva-energetica/>
- Secretaría de Energía. (2024e). *Balance Energético Nacional 2023*. Disponible en: <https://sen.hn/balance-energetico-nacional/>
- Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente. (2021). *Actualización de la Contribución Nacional Determinada*. Recuperado: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/NDC%20de%20Honduras_%20Primera%20Actualizaci%C3%B3n.pdf
- Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente. (2024a). *Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2016 - 2020 de Honduras*. Recuperado de: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Document%20NIR%20Hn%202024.pdf>
- Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente. (2024b). *Primer Informe Bienal de Transparencia de la República de Honduras (1990 - 2022)*. Recuperado de: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/DOC_UNIDO_BTR_HDR_1%2030.12.24.pdf
- Torijano, E. (2023). Estadísticas del subsector eléctrico de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), 2022 (LC/MEX/TS.2023/42), Ciudad de México, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2023. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/items/15910dd2-691f-452d-89f1-7fe01bbdbb39>

Capítulo 2

Energía, eficiencia y calidad en el secado de alimentos: el caso de la verdolaga

Beatriz Castillo-Téllez¹

beatriz.castillo@academicos.udg.mx

Margarita Castillo Téllez²

mcastill@uacam.mx

Martha Fabiola Martín del Campo³

martha.martindelcampo@academicos.udg.mx

Gerardo Alberto Mejía Pérez¹

gerardo.mejia@udg.mx

Alfredo Domínguez Niño⁴

aldoni@ier.unam.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20251963>



¹ Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche

³ Centro Universitario del Norte, Universidad de Guadalajara

⁴ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

Este capítulo analiza la eficiencia energética y la calidad del producto en procesos de secado de alimentos, tomando como caso de estudio la verdolaga (*Portulaca oleracea L.*). Se evaluaron tres métodos de secado: solar directo, solar indirecto y horno eléctrico a 55°C. El estudio abarca aspectos como el consumo de energía, costos operativos, emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y la conservación de propiedades nutricionales y fisicoquímicas del producto. Los resultados muestran que los métodos solares son significativamente más sostenibles y económicos que el horno eléctrico, logrando eficiencias energéticas del 74.61 % al 92.37 % en los métodos solares frente al 19.59 % del horno. Además, el secado solar directo y, en mayor medida, el indirecto, conservaron mejor las propiedades funcionales del producto, como la actividad antioxidante y el contenido de proteínas crudas. Esto se atribuye al impacto térmico más moderado de los métodos solares, lo que reduce la degradación de compuestos bioactivos sensibles al calor. El análisis de las cinéticas de secado, respaldado por modelos de capa delgada (Newton, Henderson y Pabis), permitió describir el comportamiento del proceso y optimizar su diseño. Los modelos destacaron que los métodos solares ofrecen una distribución más uniforme de la humedad, mejorando la estabilidad del producto durante el almacenamiento. Por otro lado, el horno, aunque rápido, mostró mayores pérdidas de calidad debido a temperaturas más elevadas. El capítulo concluye que la elección del método de secado debe basarse en las prioridades específicas del proyecto: rapidez, sostenibilidad o calidad del producto. Asimismo, se resalta la importancia del secado solar como una herramienta clave para comunidades rurales, dada su accesibilidad, bajo costo y sostenibilidad ambiental. Futuros estudios podrían enfocarse en el desarrollo de sistemas híbridos y su aplicación a otros alimentos funcionales, ampliando el impacto de estas tecnologías.

Introducción

El objetivo principal de este capítulo es analizar la eficiencia energética y la sostenibilidad en el secado de alimentos, empleando la verdolaga (*Portulaca oleracea L.*) como caso de estudio representativo. Para ello, se explorarán diferentes tecnologías de secado, incluyendo métodos solares y convencionales, con el fin de evaluar su desempeño desde una perspectiva técnica, económica y ambiental.

Este análisis se centra en dos aspectos clave:

1. Eficiencia energética:

- Identificar cómo se utiliza la energía en cada método de secado.
- Comparar el consumo energético, los costos operativos y la eficacia de los sistemas evaluados.
- Explorar el potencial de los métodos de secado solar para maximizar la captación de energía renovable y reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

2. Sostenibilidad:

- Cuantificar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas con cada método, destacando el impacto ambiental de los sistemas solares frente al horno eléctrico.
- Evaluar cómo las tecnologías de secado pueden implementarse en comunidades rurales, promoviendo prácticas sostenibles y accesibles.
- Examinar los efectos del secado sobre la calidad nutricional y funcional de los alimentos, asegurando que las propiedades esenciales se conserven.
- El capítulo busca ofrecer una visión integral que combine la teoría y la práctica, mostrando cómo las tecnologías de secado no solo preservan alimentos, sino que también contribuyen al desarrollo sostenible. Los resultados de este análisis servirán como guía para la implementación de tecnologías más eficientes y ambientalmente responsables en la industria alimentaria y en comunidades rurales.

Importancia del secado como método de conservación de alimentos

El secado es uno de los métodos de conservación más antiguos utilizados por la humanidad. Desde tiempos remotos, culturas de todo el mundo han empleado el sol y el viento para preservar alimentos como frutas, hierbas y carnes. Este proceso se basa en la eliminación del agua presente en los alimentos, reduciendo su contenido de humedad hasta niveles que inhiben el crecimiento de microorganismos y la actividad enzimática que causan deterioro (Pala-rosas, 2019).

El secado no solo prolonga la vida útil de los alimentos, sino que también facilita su almacenamiento y transporte. Al reducir el peso y el volumen de los productos, el secado disminuye los costos logísticos y mejora la disponibilidad de alimentos en épocas de escasez o en regiones alejadas (López-Vidaña et al., 2021). Además, este método de conservación mantiene gran parte de las propiedades esenciales de los alimentos, como su sabor, aroma y valor nutritivo, siempre y cuando se realice de manera adecuada (García-Valladares et al., 2024).

En la actualidad, el secado sigue siendo una técnica clave, tanto en industrias modernas como en comunidades rurales. Métodos tradicionales como el secado solar han evolucionado gracias a la incorporación de tecnologías más eficientes, como los secadores solares mixtos y los hornos eléctricos. Estas innovaciones buscan optimizar el proceso, haciéndolo más rápido, controlado y energéticamente eficiente (Pakowski et al., 1995).

La importancia del secado no radica solo en la preservación de alimentos, sino también en su contribución a la sostenibilidad. Al utilizar recursos como la energía solar, se reduce el impacto ambiental asociado con otras técnicas de conservación que requieren altos consumos de energía. Esto convierte al secado en una solución accesible y respetuosa con el medioambiente, especialmente en regiones rurales donde el acceso a la energía es limitado (Castillo-Téllez et al., 2024).

Relevancia energética en tecnologías de secado

El secado de alimentos es un proceso que, aunque fundamental para la conservación, requiere un consumo significativo de energía. En métodos convencionales, como los hornos eléctricos o de combustión, la energía necesaria para calentar el aire y evaporar el agua representa una gran parte de los costos operativos, lo que puede limitar su accesibilidad para comunidades rurales o regiones con recursos limitados (EL-Mesery et al., 2022).

En este contexto, las tecnologías de secado basadas en energía renovable, como los secadores solares, han ganado relevancia debido a su capacidad para reducir el consumo de energía convencional y disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). Estos sistemas aprovechan la radiación solar como fuente de calor, lo que los hace sostenibles y económicos, especialmente en zonas con alta disponibilidad solar (Kamfa et al., 2020).

La conservación eficiente de alimentos es un desafío crítico, especialmente en regiones rurales y comunidades indígenas donde los recursos energéticos y económicos son limitados. En este contexto, el secado solar emerge como una tecnología sostenible y de bajo costo que utiliza energía renovable para prolongar la vida útil de productos agrícolas, minimizar el desperdicio y promover prácticas de bajo impacto ambiental. Este método no solo reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables, sino que también se alinea con los objetivos globales de sostenibilidad energética y mitigación del cambio climático (Desa et al., 2020; Udomkun et al., 2020).

La eficiencia energética de un sistema de secado no solo influye en los costos operativos, sino también en la calidad del producto final. Un control adecuado de la energía utilizada puede preservar mejor las propiedades nutricionales y sensoriales de los alimentos, como su color, textura y contenido de antioxidantes. Por esta razón, el diseño y la optimización de tecnologías energéticamente eficientes son fundamentales para garantizar que el secado sea viable desde un punto de vista económico, ambiental y de calidad (Rani y Tripathy, 2023).

Además, la relevancia energética trasciende la dimensión operativa, ya que está directamente vinculada con los objetivos globales de sostenibilidad. La transición hacia sistemas que utilicen fuentes renovables,

como el secado solar, contribuye a la mitigación del cambio climático al reducir la huella de carbono de la cadena de suministro alimentaria. Esto resulta especialmente importante en un mundo donde la demanda de alimentos secos, como frutas, hierbas y especias, sigue en aumento (López et al., 2022). Estudios recientes destacan que los sistemas de secado solar pueden alcanzar eficiencias energéticas elevadas al reducir el tiempo de secado y optimizar la transferencia de calor y masa en los alimentos (Fudholi et al., 2014; Xu et al., 2021).

En el caso de la verdolaga, analizar las tecnologías de secado desde una perspectiva energética permite evaluar su sostenibilidad y su potencial para ser implementadas en comunidades rurales. Estos análisis son esenciales para promover el desarrollo de soluciones prácticas que equilibren eficiencia energética, costos y calidad del producto.

Existen diferentes variaciones en formas, colores y sabores de plantas nativas o endémicas comestibles, de las cuales se obtienen los nutrimentos necesarios que el organismo necesita y utiliza para realizar sus funciones básicas. Dentro de estas plantas nativas encontramos la verdolaga (*Portulaca oleracea* L.). Las verdolagas se consideran como un quelite, el cual se encuentra en proceso de domesticación, pudiendo ser recolectado en las orillas de las parcelas, interior de cultivos básicos, o bien ya sea cultivándose en parcelas individuales; es considerada como una planta herbácea comestible que se distribuye en las regiones templadas y tropicales del mundo. En América se conoce desde épocas precolombinas, además de ser considerada como uno de los vegetales que se consumen considerablemente en sopas y ensaladas en países como Grecia, Líbano y otros del Mediterráneo (Mendoza et al., 2020).

México es un país que cuenta con un sin número de especies vegetales nativas de las cuales el 36 % y 54 % son endémicas, considerado como un país megadiverso, algunas de estas especies son utilizadas como ornato, alimentación y uso medicinal. Dentro de estas especies encontramos la verdolaga o itzmiqilitl (*Portulaca Oleracea* L.) (McClung de Tapia et al., 2014), la cual pertenece a la familia Portulacaceae, conocida como una planta herbácea anual, con distribución cosmopolita. Este tipo de plantas dependen del temporal de lluvias, así que solo se puede encontrar durante el mismo, además, está catalogada como una de las plantas me-

dicinales más comunes, esto según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Astuti et al., 2015). En México el consumo de especies vegetales como las verdolagas (*Portulaca oleracea*), quelites (*Chenopodium spp.*), quintoniles (*Amaranthus spp.*), huazontles (*Chenopodium spp.*) y rome-ritos (*Saueda spp.*), estas especies han sido considerados como recursos de gran importancia para la alimentación de diversas comunidades indígenas, actualmente, estas especies forman parte del consumo cultural y tradicional de la población. Debido a la gran importancia económica local como regional que tiene esta especie (Román-cortés et al., 2018).

Fundamentos del secado de alimentos

Principios básicos del secado:

El secado es un proceso que consiste en la eliminación del agua contenida en los alimentos para garantizar su conservación a largo plazo. Este proceso se basa en dos principios fundamentales: la eliminación de agua libre y ligada, y la transferencia de calor y masa.

Los alimentos contienen dos tipos principales de agua:

- Agua libre, que se encuentra en los espacios intercelulares y se evapora fácilmente al estar poco unida a la estructura del alimento.
- Agua ligada, que está firmemente unida a las moléculas del alimento, como proteínas y carbohidratos, y requiere más energía para ser eliminada.

En las primeras etapas del secado, se elimina principalmente el agua libre, lo que ocurre con mayor rapidez. A medida que el contenido de humedad disminuye, la eliminación del agua ligada se vuelve más lenta, ya que requiere superar fuerzas de unión más intensas (T. Allaf y Allaf, 2014).

Transferencia de calor y masa

Durante el secado, se produce una interacción simultánea entre transferencia de calor, que proporciona la energía necesaria para evaporar el agua y transferencia de masa, que permite la salida del vapor de agua desde el alimento hacia el medioambiente (Tecante, 2009). El calor puede ser suministrado por diversas fuentes, como energía solar o eléctrica, y se

transfiere al alimento a través de conducción, convección o radiación. Al mismo tiempo, el vapor de agua generado se elimina mediante corrientes de aire que reducen la humedad en la superficie del alimento y facilitan el proceso de evaporación.

Existen varios factores que influyen en el secado, tales como a) las propiedades del alimento: como su contenido inicial de humedad, tamaño, forma y composición química. b) condiciones ambientales: temperatura, humedad relativa y velocidad del aire y c) diseño del equipo de secado: incluyendo el flujo de aire, la fuente de calor y la distribución de las bandejas (Doymaz, 2012).

- Tecnologías de secado utilizadas en la industria:

El secado ha evolucionado significativamente, desde métodos tradicionales que se basan en fuentes naturales de energía hasta tecnologías modernas diseñadas para optimizar el proceso. A continuación, se describen los enfoques más comunes:

- Métodos tradicionales:

Los métodos tradicionales, como el secado al aire libre o al sol, han sido utilizados durante siglos debido a su bajo costo y simplicidad. Estos métodos, aunque efectivos en climas cálidos y secos, presentan limitaciones como:

- Dependencia de las condiciones climáticas.
- Mayor tiempo de secado.
- Exposición a contaminantes y pérdida de calidad del producto.

A pesar de estas limitaciones, siguen siendo ampliamente utilizados en comunidades rurales debido a su accesibilidad.

Tecnologías sostenibles:

1) Secado solar controlado o tecnificado:

Estas tecnologías utilizan secadores solares con sistemas de captación y transferencia de calor que mejoran la eficiencia y reducen la exposición a contaminantes, de manera que representan una opción ecológica que aprovecha fuentes de energía renovable y reduce las emisiones de CO₂.

2) Sistemas híbridos:

Combinan energía solar con fuentes auxiliares (como eléctrica o combustibles), asegurando un secado continuo incluso en condiciones climáticas adversas. Son ideales para aplicaciones industriales que requieren tiempos de secado más predecibles.

3) Hornos eléctricos o de gas:

Ofrecen control preciso de la temperatura y tiempos de secado más cortos; sin embargo, tienen un impacto ambiental y costos operativos más altos debido a su consumo energético (Llavata et al., 2020).

Importancia de la eficiencia energética en el secado

La eficiencia energética es un factor clave en el diseño y operación de tecnologías de secado, ya que afecta tanto los costos como la sostenibilidad del proceso. Su relevancia radica en los siguientes aspectos:

- Reducción de costos operativos: El secado de alimentos es uno de los procesos más intensivos en energía dentro de la industria alimentaria (del 12 % y el 20 % del consumo energético de la industria manufacturera a nivel global) (Malekjani y Jafari, 2018). Una mayor eficiencia reduce el consumo energético, disminuyendo significativamente los costos de operación, especialmente en sistemas industriales.
- Mitigación del impacto ambiental: Las tecnologías energéticamente eficientes, como los secadores solares, minimizan las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), contribuyendo a la lucha contra el cambio climático. La transición a fuentes renovables, como la energía solar, reduce la dependencia de combustibles fósiles y promueve un enfoque más sostenible (Desa et al., 2020).
- Preservación de la calidad del producto: Un control eficiente de la energía utilizada evita el sobrecalentamiento, secados muy lentos o rayos solares dañinos para algunos alimentos que producen la pérdida de nutrientes, antioxidantes y otras propiedades esenciales del alimento (Menon et al., 2020a).

- Viabilidad en comunidades rurales: En regiones con acceso limitado a la electricidad, tecnologías como los secadores solares se convierten en una solución práctica y económica, proporcionando seguridad alimentaria a través de la conservación prolongada de alimentos.

Materiales y métodos

Secado solar

Se utilizó un secador solar mixto, diseñado en el Centro Universitario del Norte de la Universidad de Guadalajara, compuesto por tres partes principales:

- Colector solar plano: Este componente calienta el aire por convección natural.
- Cámara de secado: Con un volumen de 0.038 m^3 , incluye 8 bandejas perforadas distribuidas en 4 niveles verticales, proporcionando un área total de secado de 0.52 m^2 . La radiación solar atraviesa una cubierta de policarbonato transparente, mientras que las paredes laterales están aisladas con policarbonato de 1.27 cm de espesor.
- Chimenea: Permite la salida del aire húmedo desde la cámara de secado, mejorando la eficiencia del proceso. (Figura 1).



Figura 1. SEQ Figura * ARABIC 1. Secador solar utilizado

Secado en horno convencional

La verdolaga fue distribuida uniformemente en charolas de 0.3m×0.2m en un horno eléctrico Horno marca Riossa con rango de temperatura desde ambiente hasta 70°C, con control digital y sensibilidad $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Dimensiones internas: 33 x 30 x 28 cm y una alimentación de 127V, 50/60 ciclos.

Instrumentación utilizada

Para monitorear las variables clave durante el secado y analizar las muestras, se emplearon los siguientes equipos e instrumentos:

- Monitoreo de temperatura y velocidad del aire: Utilizando un sistema Arduino-LabVIEW conectado a una computadora mediante cable ethernet.
- Determinación de humedad: Con una balanza de humedad Ohaus MB45, precisión $\pm 0.01\%$, para muestras de 1 g, evaluadas al inicio y final del proceso.
- Medición de actividad de agua: Realizada con un equipo portátil Rotronic HygroPalm, precisión $\pm 0.01\%$, reportando el promedio de tres mediciones a una temperatura ambiente de $26.5 \pm 1^\circ\text{C}$.
- Medición de temperatura: Con termopares tipo K, calibrados con un calibrador de temperatura Ameter Jofra Instruments, rango de 10°C a -12°C y precisión $\pm 0.04^\circ\text{C}$.
- Pesaje de muestras: Utilizando una balanza de precisión Ohaus Adventure, precisión $\pm 0.001\text{ g}$.

Parámetros analizados:

- Cinéticas de secado: Las cinéticas de secado describen el comportamiento del proceso de eliminación de agua en los alimentos en función del tiempo. Estas curvas permiten identificar cómo la velocidad de secado varía en las distintas etapas del proceso, comenzando con una fase inicial rápida, donde se elimina el agua libre, y continuando con una fase más lenta, donde se elimina el agua ligada.

En este estudio, se analizaron las cinéticas de secado de la verdolaga utilizando tres métodos diferentes: secado solar directo, secado solar

indirecto y secado en horno a 55°C. Los resultados experimentales se modelaron utilizando ecuaciones de capa delgada para predecir y optimizar el comportamiento del proceso.

- Cinéticas de secado de la verdolaga: El contenido inicial de humedad de la verdolaga fue de 99 % y la actividad del agua (a_w) .95. Al final del secado, la actividad del agua disminuyó a 0.4. El secador solar directo alcanzó una temperatura de 59 °C dentro de la cámara de secado, mientras que el secador solar mixto de 78 °C y humedades de 14% y 17 % respectivamente.

La gráfica muestra la evolución del contenido de humedad (g agua/g sólidos secos) en función del tiempo de secado para tres métodos: solar directo, solar indirecto y en horno a 55°C.

En todos los casos, el contenido de humedad disminuye con el tiempo, evidenciando un patrón típico de secado donde el agua libre es eliminada primero, seguida por el agua ligada. El secado en horno a 55°C muestra la mayor eficiencia en la eliminación de humedad. La curva es más pronunciada al inicio, indicando una mayor velocidad de secado y alcanzando un contenido de humedad bajo en menor tiempo. En cuanto al secado solar directo, es casi tan eficiente como el horno a 55°C, especialmente en las primeras etapas del secado. Este método combina exposición directa al calor solar y una buena transferencia de energía, lo que resulta en una rápida pérdida de agua inicial. Por otro lado, el secado solar indirecto, aunque es efectivo, este método es el más lento de los tres. La curva es menos pronunciada, lo que indica una menor velocidad de secado debido a la transferencia indirecta de calor. Esto puede preservar mejor ciertas propiedades del producto, pero a costa de un tiempo de secado más largo.

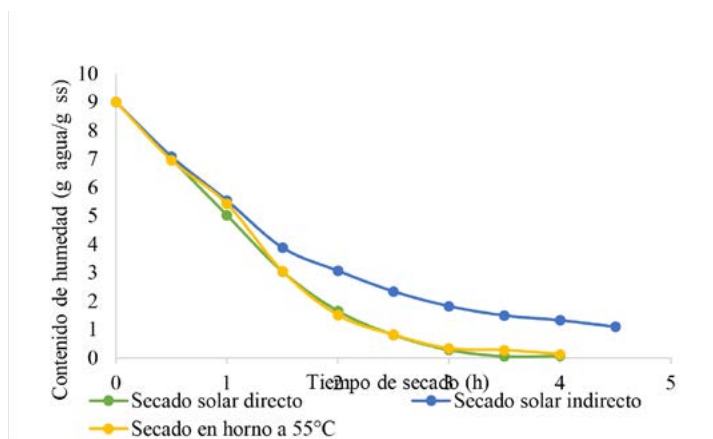


Figura 2. Contenido de humedad con respecto al tiempo de secado.

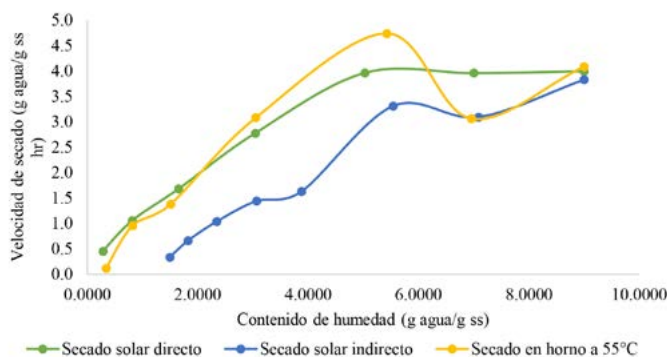


Figura 3. Velocidad de secado solar con respecto al peso de la muestra de verdolaga

La gráfica muestra cómo la velocidad de secado (g agua/g ss·h) varía con el contenido de humedad (g agua/g ss) para los tres métodos de secado: solar directo, solar indirecto y en horno a 55°C. Inicialmente, la velocidad de secado aumenta a medida que se elimina el agua libre, alcanzando un pico máximo, y luego disminuye al eliminarse el agua ligada más difícil de evaporar.

- Secado en horno a 55°C: Este método tiene la mayor velocidad de secado en las primeras etapas y alcanza el pico más alto (~4.5 g agua/g

ss·h), lo que refleja su alta eficiencia para eliminar rápidamente el agua libre. Sin embargo, después del pico, la velocidad disminuye más abruptamente, lo que puede deberse a una mayor eliminación de agua ligada.

- Secado solar directo: Este método es competitivo con el horno en términos de velocidad de secado, pero su pico (~ 4 g agua/g ss·h) es ligeramente menor. Esto lo hace eficiente y energéticamente más sostenible, aunque menos controlado que el horno.
- Secado solar indirecto: Es el método con la menor velocidad de secado en general. Su curva más gradual indica una eliminación más lenta de humedad, lo que puede ser beneficioso para preservar la calidad del producto, aunque a costa de un mayor tiempo total de secado.

Etapas del secado

- Fase inicial: En todos los métodos, la velocidad aumenta rápidamente debido a la eliminación del agua libre, que es más fácil de evaporar.
- Fase intermedia: En el horno y el secado solar directo, la velocidad se mantiene alta por más tiempo, lo que refleja su mayor eficiencia en la transferencia de calor. En el secado solar indirecto, la velocidad es más baja debido a la menor exposición directa al calor.
- Fase final: En todos los casos, la velocidad disminuye notablemente cuando se elimina principalmente el agua ligada, que requiere más energía para evaporarse.

Análisis energético

- Cálculo de la energía utilizada y disponible: El análisis energético comienza con el cálculo de la energía requerida para evaporar el agua de la verdolaga (energía utilizada) y la energía proporcionada por las diferentes fuentes disponibles (energía disponible). Donde la energía utilizada se calcula como:

Energía Utilizada (kJ)=Masa de Agua Evaporada (kg)×Calor Latente (kJ/kg)

- Energía requerida para la evaporación del agua: La cantidad de energía necesaria para evaporar 2.5 kg de agua de la verdolaga, considerando un calor latente de vaporización de 2257 kJ/kg, se estimó en 5642.5 kJ. Este valor representa el objetivo energético que los sistemas de secado deben alcanzar para completar el proceso de eliminación de humedad.
- Energía disponible para el horno:
 $\text{Energía disponible (kJ)} = P(\text{kW}) \times t(\text{h}) \times 3600 (\text{kJ/kWh})$
Donde la potencia es 2 kW, el tiempo de operación fueron 4 horas (de acuerdo con la Figura 2).
Por lo que la energía disponible son 28 800 kJ. Para los sistemas solares, incluye radiación directa, difusa y calor ambiental, desarrollados en la siguiente sección.

Incorporación de radiación directa, difusa y calor ambiental

En los sistemas solares, la energía disponible proviene de múltiples fuentes:

Radiación directa: Energía proveniente del sol, medida en kWh/m²/día, la radiación difusa, que es la energía solar dispersada en la atmósfera, estimada como un porcentaje de la radiación directa (15%) y el calor ambiental es la contribución de la temperatura ambiental al proceso.

Radiación directa:

- Radiación mínima: 4.5 kWh/m²/día.
- Radiación máxima: 5.8 kWh/m²/día.

Radiación difusa:

- Radiación difusa (kJ/m²)=Radiación Directa (kJ/m²)×0.15
- Radiación difusa mínima: $16,200 \times 0.15 = 2,430 \text{ kJ/m}^2$

Calor ambiental:

- Contribución estimada: 1000 kJ/día

Energía total disponible

Para el secado solar directo:

Energía disponible (kJ)=(Radiación directa + Radiación difusa) × A(Área)+Calor Ambiental

Eficiencia de cada método de secado

La eficiencia energética se define como la relación entre la energía útil (energía requerida para evaporar el agua) y la energía total disponible en el sistema de secado:

$$\text{Eficiencia energética (\%)} = \left(\frac{\text{Energía utilizada (kJ)}}{\text{Energía disponible (kJ)}} \right) \times 100$$

Donde la energía utilizada se calcula como:

Energía utilizada (kJ)=Masa de agua evaporada (kg)×Calor latente (kJ/kg)

Para los métodos solares, la energía disponible incluye la radiación directa, difusa y el calor ambiental. En el horno, se calcula a partir de la potencia del equipo y el tiempo de operación (de los tiempos experimentales para alcanzar la humedad de equilibrio que muestra la Figura 2).

El análisis energético de los sistemas de secado evaluados, basado en la radiación solar incidente y las características de los equipos, proporciona información valiosa sobre la eficiencia y el rendimiento energético de los métodos estudiados. A continuación, se resumen los principales hallazgos:

- Energía requerida para la evaporación del agua: La cantidad de energía necesaria para evaporar 2.5 kg de agua de la verdolaga, considerando un calor latente de vaporización de 2257 kJ/kg, se estimó en 5642.5 kJ. Este valor representa el objetivo energético que los sistemas de secado deben alcanzar para completar el proceso de eliminación de humedad.
- Energía disponible en el colector solar: Con un área de colector de 2.52 m² y una eficiencia del 35.17 %, el colector solar puede proporcionar una energía diaria de:
- 13,745.6 kJ/día bajo condiciones de radiación solar mínima (4.5 kWh/m²/día).

- 17,706.8 kJ/día bajo condiciones de radiación solar máxima (5.8 kWh/m²/día).

Esto indica que el colector solar puede generar más del doble de la energía requerida para evaporar el agua, lo que confirma su viabilidad para el proceso de secado en regiones con buena disponibilidad de radiación solar.

- Energía disponible en el secador solar directo: Con un área de secado de 1 m² y una eficiencia del 30 %, el secador solar directo puede proporcionar una energía diaria de:
- Radiación mínima: Incluyendo radiación difusa y calor ambiental: 6108.5 kJ/día.
- Radiación máxima: Incluyendo radiación difusa y calor ambiental: 7564.0 kJ/día.

Este rango de energía disponible es suficiente para cubrir las necesidades energéticas en condiciones de radiación solar máxima, pero puede ser limitado bajo radiación mínima.

Eficiencia energética:

Horno a 55°C:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{28,800} \right) \times 100 = 19.59\%$$

Con lo que concluimos que se tiene una dependencia total de energía eléctrica, con costos altos y emisiones significativas.

Secador solar directo:

Radiación mínima:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{6,108.5} \right) \times 100 = 92.37\%$$

Radiación máxima:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{7,564.0} \right) \times 100 = 74.61\%$$

Secador solar indirecto:

Radiación mínima:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{13,745.6} \right) \times 100 = 41.05\%$$

Radiación máxima:

$$\eta = \left(\frac{5,642.5}{17,706.8} \right) \times 100 = 31.87\%$$

Estos resultados demuestran que el colector y el secador solares directo son sistemas energéticamente viables para el secado de la verdolaga, con el colector siendo más eficiente bajo condiciones de alta radiación solar y el secador directo dependiendo en parte de fuentes externas para maximizar su eficiencia. En regiones con alta radiación solar, como Colotlán, el secado solar directo puede ser una solución efectiva y sostenible para conservar alimentos como la verdolaga, siempre que se optimice su diseño para mejorar la captación de energía.

El colector solar puede desempeñar un papel crucial como fuente de calor adicional en sistemas híbridos, mejorando la velocidad y uniformidad del proceso de secado.

Impacto en costos y emisiones de CO₂

El costo operativo se calcula considerando el consumo de energía y la tarifa eléctrica:

Costo (USD)=Energía consumida (kWh)×Tarifa eléctrica (USD/kWh)

- Horno a 55°C: $2 \text{ kW} \times 4 \text{ h} = 8 \text{ kWh}$
- Costo = $8 \times 0.10 \text{ (USD/kWh)} = 0.80 \text{ USD}$

Secado Solar Directo: $0.1 \text{ kW} \times 4 \text{ h} = 0.4 \text{ kWh}$

Costo = $0.4 \times 0.10 = 0.04 \text{ USD}$

Los resultados muestran que los sistemas solares son significativamente más económicos, con un ahorro del 95 % frente al horno eléctrico.

Emisiones:

- Horno: $8 \text{ kWh} \times 0.5 \text{ (kg CO}_2\text{/kWh)} = 4.0 \text{ kg CO}_2$
- Secado solar directo: $0.4 \times 0.5 = 0.2 \text{ kg CO}_2$

Comparando los métodos, el secado solar mostró una reducción significativa en ambos indicadores:

- Ahorro de costos energéticos: 95 %, pasando de 0.80 USD en el horno eléctrico a 0.04 USD en los sistemas solares.

Reducción de emisiones de CO₂: 95 %, con un ahorro de 3.8 kg de CO₂ por ciclo de secado.

- Comparación entre secado solar y horno.

El análisis comparativo de los métodos de secado, considerando los costos energéticos y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), resalta las ventajas del secado solar frente al horno eléctrico. Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

Secado en horno eléctrico

El horno eléctrico, con una potencia de 2 kW y un tiempo de operación de 4 horas, presentó un costo energético de 0.80 USD por ciclo de secado, considerando una tarifa eléctrica de 0.10 USD/kWh. En términos de impacto ambiental, las emisiones generadas alcanzaron los 4.0 kg de CO₂ por ciclo, asumiendo un factor de emisión promedio de 0.5 kg CO₂/kWh, típico en redes eléctricas convencionales.

Secado solar directo e indirecto

Para los métodos de secado solar, se consideró el consumo energético de un ventilador auxiliar con una potencia de 0.1 kW operando durante el mismo periodo de 4 horas. Los costos asociados fueron significativamente menores, con 0.04 USD por ciclo, mientras que las emisiones generadas se limitaron a 0.2 kg de CO₂. Esto resalta el bajo impacto ambiental del secado solar, dado que la mayor parte de la energía proviene del sol, una fuente renovable.

El secado solar, tanto en su modalidad directa como indirecta, representa una alternativa económicamente accesible y ambientalmente responsable para la conservación de alimentos como la verdolaga. Además de los ahorros económicos, el uso de energía solar reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la sostenibilidad en comunidades rurales. Este análisis refuerza la viabilidad del secado solar como una solución adecuada en regiones con alta radiación solar y acceso limitado a redes eléctricas convencionales.

Modelos matemáticos de secado

El secado de alimentos es un proceso dinámico que involucra la transferencia simultánea de calor y masa. Para comprender y optimizar este proceso, se emplean modelos matemáticos que describen la relación entre la humedad del alimento y el tiempo de secado. Entre estos modelos, los de capa delgada son ampliamente utilizados debido a su simplicidad, precisión y aplicabilidad en diversos materiales alimenticios (Castillo-Téllez et al., 2023).

Los modelos de capa delgada permiten ajustar experimentalmente las cinéticas de secado y predecir el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones. Estos modelos se basan en ecuaciones empíricas o semiempíricas que relacionan el radio de humedad (MR) con el tiempo de secado. Al ajustar los datos experimentales a estos modelos, es posible estimar parámetros clave como la constante de velocidad de secado (k) y el exponente (n), los cuales proporcionan información sobre las características específicas del proceso (Patil y Gawande, 2017).

En este estudio, se evaluaron varios modelos de capa delgada, incluidos los de Newton y Henderson y Pabis, para describir las cinéticas de secado de la verdolaga (*Portulaca oleracea L.*). Los resultados de estos modelos no solo ayudan a interpretar el desempeño de los métodos de secado solar y horno eléctrico, sino que también ofrecen herramientas prácticas para el diseño y optimización de sistemas de secado (Erick César et al., 2020).

Esta sección detalla los fundamentos de los modelos utilizados, los parámetros obtenidos y su relevancia en la predicción del comportamiento del secado en diferentes condiciones ambientales y operativas. Los hallazgos permitirán identificar el modelo más adecuado y su utilidad en aplicaciones futuras.

El uso de modelos matemáticos, como los de Newton y Henderson y Pabis, permite comprender las dinámicas del secado, mejorar los diseños de equipos y aumentar la sostenibilidad de los procesos (Menon et al., 2020b). Estas herramientas son esenciales para analizar la cinética del secado y determinar la eficiencia de los sistemas, especialmente en aplicaciones que combinan métodos tradicionales con tecnologías modernas.

Los modelos de capa delgada aplicados en este estudio se muestran en Tabla 2. El radio de humedad (MR) es una función del tiempo de secado y se calcula como en (Togrul y Pehlivan, 2004):

$$MR = \frac{M_c - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Donde M_c es el contenido de humedad, M_e es la humedad de equilibrio, y M_0 es el contenido de humedad inicial.

Tabla 1. Modelos de capa delgada aplicados a las cinéticas de secado

Nombre	Modelo	Referencia
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Liu & Bakker-Arkema, 1997)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Page, 1949)
Page Modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	(White et al., 1981)
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Henderson & Pabis, 1961)
Logaritmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Toğrul, 2005)
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	(Wang & Singh, 1978)
Weibull	$MR = \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right)^\alpha$	(Tzempelikos et al., 2015)

Ajuste de los datos experimentales

En el presente análisis, se evaluaron diferentes modelos de capa delgada aplicados al secado de la verdolaga (*Portulaca oleracea L.*), incluyendo los modelos presentados en la tabla 1, resultando los de Newton y Henderson y Pabis los que más describen el comportamiento de las cinéticas del secado de verdolaga para las tres tecnologías utilizadas en este trabajo.

Modelo de Newton:

Este modelo describe la cinética de secado mediante una relación exponencial simple. Aunque es útil para representar el comportamiento general del secado, puede ser limitado para procesos más complejos debido a su simplicidad.

En este estudio, el modelo mostró un buen ajuste inicial, con valores de R^2 superiores a 0.95 en algunos casos. Sin embargo, presenta desviaciones en las etapas finales del secado, donde predominan mecanismos de difusión interna.

Modelo de Henderson y Pabis:

Este modelo incluye un parámetro multiplicador (a), que permite una mayor precisión al ajustar las primeras etapas del secado. No obstante, tiende a subestimar las etapas finales del proceso. En este caso, el modelo mostró un desempeño intermedio, con R^2 en el rango de 0.93 a 0.97, dependiendo del método de secado.

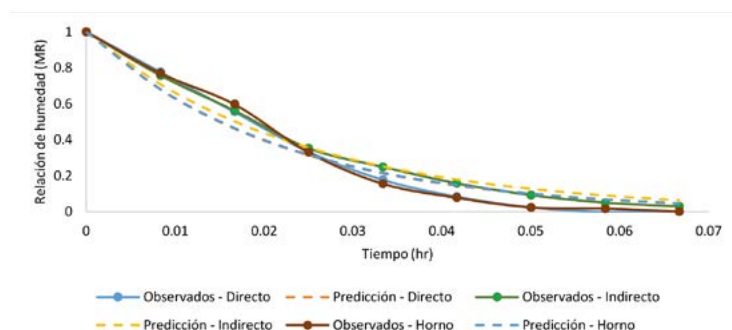


Figura 4. Comparación de datos observados y predicciones de modelos de capa delgada en diferentes métodos de secado

La gráfica muestra la relación de humedad (MR) frente al tiempo para los métodos de secado solar directo, solar indirecto y en horno, comparando los valores experimentales observados con las predicciones de los modelos de capa delgada. Los modelos empleados muestran un buen ajuste a los datos experimentales en los tres métodos de secado.

En cuanto al secado solar indirecto, las predicciones son ligeramente superiores a los valores observados en las fases intermedias, lo que puede deberse a una menor transferencia de calor en comparación con el secado directo. Por último, en el horno, se observa que presenta la mayor congruencia entre datos observados y predicciones, reflejando el control térmico constante del sistema.

Estos resultados destacan la utilidad de los modelos de capa delgada para optimizar procesos de secado, permitiendo predecir tiempos de secado y diseñar sistemas energéticamente eficientes.

Tabla 2. Estadísticas de ajuste para modelos de secado de verdolaga

Método	Modelo	RMSE	R ²
Directo	Newton	0.0631	0.9673
Directo	Henderson y Pabis	0.0583	0.9721
Indirecto	Newton	0.0339	0.9890
Indirecto	Henderson y Pabis	0.0310	0.9908
Horno	Newton	0.0704	0.9598
Horno	Henderson y Pabis	0.0657	0.9650

La Tabla 2 resume el desempeño de los modelos de capa delgada seleccionados (Newton y Henderson y Pabis) aplicados a los tres métodos de secado: solar directo, solar indirecto y horno. Los criterios de evaluación incluyen el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Coeficiente de Determinación (R^2), los cuales permiten evaluar la precisión del ajuste de los modelos a los datos experimentales. En todos los métodos de secado, los modelos presentan valores de R^2 elevados, lo que indica un buen ajuste entre los datos observados y las predicciones. El modelo Henderson y Pabis tiene un desempeño ligeramente mejor que el modelo de Newton en términos de R^2 para todos los métodos, destacando su mayor capacidad para capturar las complejidades del proceso de secado. Los valores de RMSE son relativamente bajos para ambos modelos, lo que confirma que las diferencias entre los valores predichos y observados son pequeñas. El modelo Henderson y Pabis muestra consistentemente menores valores de RMSE en comparación con el modelo de Newton, lo que refuerza su mejor ajuste en términos absolutos.

Análisis nutricional

El secado de alimentos no solo se centra en la eliminación de agua para su conservación, sino que también influye directamente en las propiedades fisicoquímicas y nutricionales de los productos. Estas propiedades determinan tanto la calidad del alimento como su aceptación por parte del consumidor y su valor como recurso funcional.

Desde una perspectiva fisicoquímica, el secado puede afectar aspectos como la textura, el color y la estabilidad del alimento debido a cambios

estructurales y reacciones químicas provocadas por el calor y la pérdida de agua. Por otro lado, las propiedades nutricionales, como el contenido de proteínas, vitaminas y antioxidantes, también pueden verse alteradas, especialmente en procesos donde las temperaturas son altas o el tiempo de exposición al calor es prolongado.

En este contexto, resulta crucial evaluar cómo los diferentes métodos de secado impactan en estas propiedades. Métodos como el secado solar, al utilizar temperaturas más suaves y un enfoque sostenible, tienden a preservar mejor ciertos nutrientes y características organolépticas en comparación con tecnologías más intensivas como los hornos eléctricos.

Esta sección analiza las principales propiedades fisicoquímicas y nutricionales de la verdolaga (*Portulaca oleracea* L.) antes y después del secado, considerando factores como la conservación de proteínas crudas, la actividad antioxidante (DPPH y ABTS) y los cambios estructurales. Los resultados permitirán evaluar la viabilidad de los métodos de secado desde una perspectiva integral que considere tanto la calidad del alimento como la eficiencia del proceso.

Cambios en las propiedades nutrimentales de la verdolaga:

- Contenido de proteína cruda.

Para la determinación de actividad antioxidante y de proteína cruda, se utilizaron los métodos colorimétricos de ABTS y DPPH para actividad antioxidante. Para la determinación de proteína cruda se utilizó el método Kjeldahal.

- ABTS

Preparar una solución de ABTS a 7mM, pesando 19 mg de reactivo ABTS en un frasco ámbar y se le añade 4 ml de agua destilada y 88 µl de persulfato de potasio y se deja agitando por lo menos 2 horas y se afora a 5 ml. Para la muestra se hace una dilución de 1:10 de ABTS y se agrega en una placa para lectura en espectrofotómetro 100 µl y 50 µl de muestra y se lee a 734 nm (Gutierrez et al., 2009).

- Actividad antioxidante (DPPH y ABTS).

DPPH: Preparar una solución de DPPH, pesando 3.94 mg del reactivo DPPH y se disuelve en 10 ml de metanol al 100 %, se deja en agitación constante aproximadamente por 12 horas, se afora a 20 ml y se coloca en un frasco ámbar, se refrigera a una temperatura de 4 °C.

Para la determinación de actividad antioxidante se agregan 100 μ l del reactivo (dejar que se atempere antes de usar) y 50 μ l de muestra en microplaca, y leer a 715 nm (Szabo et al., 2007).

- Método Soxhlet para extracto etéreo: Para desgrasar la muestra se utilizó el método Soxhlet, aplicando a la muestra seca, molida y tamizada en maya No. 60, 200ml de éter etílico, dejando destilar aproximadamente por dos horas. (Padrón Márquez et al., 2003).
- Método Kendahl: Este método se utiliza para determinar el porcentaje de proteína cruda (el término de proteína cruda se refiere a que todo el nitrógeno contenido en la muestra no está formado de proteína) de los alimentos, llevando a cabo un proceso de digestión, pesando 1.5 g de muestra en estado seco y desgrasada; se agrega ácido sulfúrico puro y dos pastillas catalizadoras Kendahl. Al terminar la digestión, se deja enfriar a temperatura ambiente y se afora a 100 ml con agua destilada. Para determinar el porcentaje de proteína, se lleva a cabo un proceso de destilación, el cual se lleva a cabo agregando al resultado de la digestión 70 ml de hidróxido de sodio al 4 %. En un matraz de 250 ml se agregan 70 ml de ácido bórico al 4 % y 5 gotas del indicador Shiro Tashiro y se destila hasta alcanzar un volumen de 150 ml (García Martínez et al., 2013).

Comparación entre métodos de secado

La Tabla 3 resume las propiedades nutricionales de la verdolaga fresca y después de ser sometida a secado solar directo e indirecto. Los datos evidencian una reducción en el contenido de proteína cruda y en la actividad antioxidante medida mediante los métodos DPPH y ABTS, lo que refleja los efectos del proceso de secado (Petropoulos et al., 2019).

Tabla 3. *Propiedades nutrimentales de la verdolaga, pre y post tratamiento de secado*

Muestra	% Proteína cruda	Actividad DPPH (mg)	Actividad ABTS (mg)
Fresco	25.9	72.78	1493.246
Secado solar directo	12.47	67.91	1414.933
Secado solar indirecto	13.5	62.96	1056.621

Proteína cruda:

El contenido de proteína cruda disminuyó notablemente tras el secado, con reducciones mayores en el secado solar directo (12.47 %) que en el indirecto (13.5 %). Esto podría deberse a la exposición directa al calor en el método directo, que afecta las proteínas más rápidamente.

Actividad antioxidante (DPPH y ABTS):

- DPPH: La actividad antioxidante medida mediante este método disminuyó ligeramente tras el secado, pasando de 72.78 mg en la muestra fresca a 67.91 mg en el secado directo y 62.96 mg en el secado indirecto. Esto sugiere que, aunque parte de los antioxidantes se conservan, el secado afecta su disponibilidad.
- ABTS: En el método ABTS, la disminución fue más marcada, con valores de 1414.933 mg y 1056.621 mg para los secados directo e indirecto, respectivamente, en comparación con 1493.246 mg en la muestra fresca. Este resultado indica una mayor sensibilidad de estos antioxidantes al calor y al oxígeno durante el secado.
- Implicaciones para la calidad final del producto.

Aunque el secado solar directo es más rápido, este método causa una mayor reducción en la actividad antioxidante y el contenido de proteína cruda, debido a la exposición directa al calor. Sin embargo, conserva mejor estas propiedades que otros métodos más agresivos, como el horno.

Contrariamente, el secado solar indirecto, aunque más lento, preserva

en mayor medida la proteína cruda y la actividad antioxidante medida mediante ABTS, lo que lo hace más adecuado para productos donde la calidad nutrimental es prioritaria Battocchio et al. (2021) encontraron igualmente ventajas en secado solar significativas en la conservación de antioxidantes y vitaminas.

La elección del método de secado de la verdolaga debe alinearse con las prioridades específicas del proyecto, ya sea rapidez, sostenibilidad o calidad del producto.

El secado en horno a 55°C es el más eficiente en términos de tiempo, aunque impacta negativamente en la calidad nutricional, con mayores pérdidas de proteínas y antioxidantes. Sin embargo, el secado solar directo ofrece un equilibrio entre eficiencia energética y sostenibilidad, siendo casi tan rápido como el horno, pero más económico y ecológico, gracias al uso de energía renovable.

El secado solar indirecto, aunque más lento, es ideal para alimentos que requieren un manejo delicado, conservando mejor las proteínas y antioxidantes debido a temperaturas más moderadas y un proceso gradual. El secado solar indirecto conserva mejor la proteína cruda; esta propiedad, mientras que el horno presenta la mayor reducción. Por otro lado, los métodos solares, especialmente el directo, preservan mejor la actividad antioxidante que el horno. Todos los métodos logran niveles efectivos para garantizar la estabilidad del producto, pero el secado solar indirecto podría ofrecer una mayor uniformidad en la distribución de la humedad.

Conservación de compuestos bioactivos: La menor pérdida de actividad antioxidante en los métodos solares sugiere que estos preservan mejor los compuestos bioactivos de la verdolaga, tal como (Uribe et al., 2020) encontraron en sus análisis. Esto tiene implicaciones importantes para el desarrollo de productos funcionales o nutracéuticos, donde la retención de antioxidantes es fundamental para su valor agregado.

Discusión general

Relación entre eficiencia energética y calidad del producto

Los resultados muestran que los métodos solares, especialmente el indirecto, destacan por su alta eficiencia energética (74.61 % a 92.37 %) y mejor conservación de proteínas y actividad antioxidante en comparación con el horno eléctrico (eficiencia del 19.59 %). Aunque el horno ofrece tiempos de secado más rápidos, provoca mayores pérdidas nutricionales debido a temperaturas constantes más elevadas.

El secado solar es más económico, con un ahorro del 95 % en costos energéticos y menores emisiones de dióxido de carbono (CO_2), lo que refuerza su viabilidad como alternativa sostenible y eficiente. Este método es ideal para aplicaciones donde la calidad del producto, en términos de nutrientes y compuestos bioactivos, es prioritaria.

Los métodos solares equilibran eficiencia energética, sostenibilidad y preservación de calidad, convirtiéndolos en opciones adecuadas para el secado de alimentos como la verdolaga.

Viabilidad del secado solar para comunidades rurales

Los métodos de secado solar son soluciones accesibles y sostenibles para comunidades rurales, gracias a su uso de energía solar gratuita y su bajo costo operativo (un 95 % más económico que el horno eléctrico). Estos sistemas reducen las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y contribuyen a la mitigación del cambio climático, haciendo que sean opciones responsables ambientalmente.

Además, el secado solar conserva alimentos como la verdolaga, prolongando su disponibilidad y preservando su valor nutricional, lo que mejora la seguridad alimentaria local. Su simplicidad facilita su implementación y mantenimiento, promoviendo la autonomía y el empoderamiento de las comunidades, al tiempo que fomenta el desarrollo económico mediante la producción de alimentos deshidratados con valor agregado. El secado solar es una herramienta clave para la sostenibilidad y el desarrollo rural, equilibrando accesibilidad, calidad alimentaria y responsabilidad ambiental.

Referencias

- Allaf, T., & Allaf, K. (2014). *Instant Controlled Pressure Drop (D. I. C.) in Food Processing, From Fundamental to Industrial Applications (K. Allaf & T. Allaf (eds.))*. Springer.
- Astuti, S. I., Arso, S. P., & Wigati, P. A. (2015). *VERDOLAGA: una alternativa saludable. Analisis Standar Pelayanan Minimal Pada Instalasi Rawat Jalan Di RSUD Kota Semarang*. 3, 103–111.
- Battocchio, C., Bruni, F., Di Nicola, G., Gasperi, T., Iucci, G., Tofani, D., Varesano, A., & Venditti, I. (2021). Solar cookers and dryers: Environmental sustainability and nutraceutical content in food processing. *Foods*, 10(10), 1–19. <https://doi.org/10.3390/foods10102326>
- Castillo-Téllez, B., Castillo Téllez, M., Campo, M. F. M. del, González, E. O. Z., Domínguez Niño, A., & Mejía-Pérez, G. A. (2024). Enhancing the Circular Economy. *Sustainability*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/su16156593>
- Castillo-Téllez, B., Téllez, M. C., López-Vidaña, E. C., Domínguez Niño, A., Mejía-Pérez, G. A., & Vega-Gómez, C. J. (2023). Temperature–air velocity association, experimental and modeling study of stevia leaves solar drying. *Energy Exploration and Exploitation*, 41(5), 1802–1818. <https://doi.org/10.1177/01445987231176308>
- Desa, W. N. Y. M., Fudholi, A., & Yaakob, Z. (2020). Energy-economic-environmental analysis of solar drying system: A review. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 11(2), 1011–1018. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp1011-1018>
- Doymaz, I. (2012). Air-drying characteristics, effective moisture diffusivity and activation energy of grape leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36(2), 161–168. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00557.x>
- EL-Mesery, H. S., EL-Seesy, A. I., Hu, Z., & Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112070. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>
- Erick César, L.-V., Ana Lilia, C.-M., Octavio, G.-V., Isaac, P. F., & Rogelio, B. O. (2020). Thermal performance of a passive, mixed-type

- solar dryer for tomato slices (*Solanum lycopersicum*). *Renewable Energy*, 147, 845–855. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.018>
- Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Gabbasa, M., & Kazem, H. A. (2014). Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy*, 99, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.019>
- García-Valladares, O., Domínguez-Niño, A., Lucho-Gómez, A. M., Jiménez-Montiel, A. G., Rodríguez-Mendoza, A. S., Castillo-Téllez, B., Luna-Flores, M., & Castillo-Téllez, M. (2024). Mixed-Mode Solar Drying and its Effect on Physicochemical and Colorimetric Properties of Zompante (*Erythrina Americana*). *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(1), 194–201. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01147-0>
- García Martínez, E., Fernández Segovia, I., & Fuentes López, A. (2013). *Aplicación de la determinación de proteínas de un alimento por el método Kjeldahl. Valoración con una base fuerte*. ETSIAMN. Universidad Politécnica de Valencia, 1–7.
- Gutierrez, G., Acevedo, A., Ballarte, N., Llajaruna, P., Aquise, S., Espinoza, T., & Jacobo, Q. (2009). *Antocianinas , fenoles totales y actividad antioxidante de las corontas del maíz morado (Zea mays L .): Método de extracción*.
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory II: Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), 169–174.
- Kamfa, I., Fluch, J., Bartali, R., & Baker, D. (2020). Solar-thermal driven drying technologies for large-scale industrial applications: State of the art, gaps, and opportunities. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 9864–9888. <https://doi.org/10.1002/er.5622>
- Liu, Q., & Bakker-Arkema, F. W. (1997). Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 66(4), 275–280. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0145>
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., & Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20–26. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2019.12.001>

- López-, E. C., Niño, A. D., García-, O., Isaac, V., Figueroa, P., Castillo, M., & Beatriz, T. (2022). *Indirect and mixed- mode solar drying and its effect on physicochemical properties of raw and cooked chicken breast meat*. June, 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16848>
- López-Vidaña, E. C., Castillo Téllez, M., Pilatowsky Figueroa, I., Santis Espinosa, L. F., & Castillo-Téllez, B. (2021). Moisture sorption isotherms, isosteric heat, and Gibbs free energy of stevia leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(1), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15016>
- Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206–223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>
- McClung de Tapia, E., Martínez Yrizar, D., Ibarra Morales, E., & Adriano Morán, C. C. (2014). Los orígenes prehispánicos de una tradición alimentaria en la cuenca de México. *Anales de Antropología*, 48(1), 97–121. [https://doi.org/10.1016/s0185-1225\(14\)70491-6](https://doi.org/10.1016/s0185-1225(14)70491-6)
- Mendoza, R., Poma, D., Purizaca, J., & Sullcaray, J. (2020). *Evaluación de polifenoles y flavonoides totales y actividad antioxidante in vitro a partir de extractos de hojas de verdolaga (portulaca oleracea l.) de la región Piura, Perú*.
- Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. A. (2020a). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science and Technology*, 100(June 2019), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.014>
- Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. A. (2020b). A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 67–76. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.03.014>
- Padrón Márquez, B., Oranday Cárdenas, M., Rivas Morales, C., & Verde Star, M. (2003). Identificación de compuestos de Melia, Azaderach, Syzgium aromaticum y Zinnamomum Zeylanicum con efecto inhibitorio sobre bacterias y hongos. *Ciencia UANL*, 6(3), 333–338.

- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. M. S. Thesis. Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Pakowski, Z., Mujumdar, A. S., & Mujumdar, A. S. (1995). *Handbook of Industrial Drying*: Vol. null (2nd (ed.)).
- Pala-rosas, I. (2019). Current Drying Processes. In *Current Drying Processes*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78916>
- Patil, R. C., & Gawande, R. R. (2017). Mathematical modeling of solar drying systems. In *Green Energy and Technology* (Vol. 0, Issue 9789811038327). https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4_9
- Petropoulos, S. A., Fernandes, Â., Dias, M. I., Vasilakoglou, I. B., Petrotos, K., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2019). *Nutritional value, chemical composition and cytotoxic properties of common purslane (Portulaca oleracea L.) in relation to harvesting stage and plant part*. In *Antioxidants* (Vol. 8, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/antiox8080293>
- Rani, P., & Tripathy, P. P. (2023). Drying characteristics and performance acceleration of a mixed-mode solar dryer using finned collector for pineapple slice drying. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05107-7>
- Román-cortés, N. R., García-mateos, M. R., Castillo-gonzález, A. M., Sahagún-castellanos, J., & Adelina, M. (2018). *Características nutricionales y nutraceuticas de hortalizas de uso ancestral en México nutritional and nutraceutical characteristics of vegetables of ancestral use in Mexico*. 41(3), 245–253.
- Szabo, M. R., Idrîoiu, C., Chambre, D., & Lupea, A. X. (2007). Improved DPPH determination for antioxidant activity spectrophotometric assay. *Chemical Papers*, 61(3), 214–216. <https://doi.org/10.2478/s11696-007-0022-7>
- Tecante, A. (2009). *Fundamentos de secado, extracción solido-líquido y destilación. Fundamentos de Secado, Extracción Sólido-Líquido y Destilación*. 1–73.
- Toğrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, 71(3), 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.031>

- Togrul, T. I., & Pehlivan, D. (2004). No Title. *J. Food Eng.*, 65(null), 413.
- Tzempelikos, D. A., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., & Margaritis, D. P. (2015). Experimental study on convective drying of quince slices and evaluation of thin-layer drying models. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8(3), 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.12.002>
- Udomkun, P., Romuli, S., Schock, S., Mahayothee, B., Sartas, M., Wossen, T., Njukwe, E., Vanlauwe, B., & Müller, J. (2020). Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach. *Journal of Environmental Management*, 268, 110730. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110730>
- Uribe, E., Pardo-Orellana, C. M., Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K. S., Pastén, A., García, V., & Aubourg, S. P. (2020). Effect of drying methods on bioactive compounds, nutritional, antioxidant, and antidiabetic potential of brown alga *Durvillaea antarctica*. *Drying Technology*, 38(14), 1915–1928. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1679830>
- Wang, C. Y., & Singh, R. P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *American Society of Agricultural Engineers*, 78, 3001. <https://doi.org/10.1081/E-EEE2-120046011>
- White, G. M., Ross, I. J., & Poneleit, C. G. (1981). Fully-exposed drying of popcorn. *European Physical Education Review*, 24(2), 466–468, 475. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/17506200710779521>
- Xu, B., Wang, D., Li, Z., & Chen, Z. (2021). Drying and dynamic performance of well-adapted solar assisted heat pump drying system. *Renewable Energy*, 164, 1290–1305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.104>

Capítulo 3

Gestión energética en MIPYMES de Bogotá – Colombia: desafíos y oportunidades bajo el marco de políticas gubernamentales

Flover Artunduaga Lizcano¹
fartunduaga@uniminuto.edu

Lorena Galvis¹
deisy.galvis@uniminuto.edu
Obed Fragozo Manjarrez¹
obed.fragozo@uniminuto.edu
Harold Castilla De Voz¹
hcastilla@uniminuto.edu

<https://doi.org/10.61728/AE20251970>



¹ Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO) Colombia

Resumen

La gestión energética en las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes) es esencial para la sostenibilidad y la eficiencia operativa. Este capítulo explora las prácticas actuales de gestión energética, las barreras enfrentadas y las oportunidades para mejorar la eficiencia energética de las MiPymes en Bogotá. En este capítulo se analiza el nivel de conocimiento, comprensión e implementación de mejores prácticas de gestión energética al interior de las MiPymes. Así como las políticas públicas vigentes que buscan fomentar prácticas energéticas sostenibles mediante incentivos financieros y apoyo técnico. Utilizando una metodología mixta que combina análisis documental y el análisis descriptivo de 429 encuestas cuantitativas. Los resultados indican que solo un 35% de las empresas conoce las mejores prácticas y tecnologías para reducir el consumo de energía, lo que indica una brecha significativa en el conocimiento técnico. Se concluye que un mayor esfuerzo gubernamental en educación y financiamiento puede potenciar la adopción de prácticas energéticas sostenibles en las MiPymes de Bogotá.

Introducción

La gestión energética se refiere a la planificación y operación de unidades de producción y consumo de energía para asegurar el uso óptimo de la energía. En el contexto de las MiPymes, esto implica la implementación de prácticas y tecnologías que reduzcan el consumo de energía y mejoren la eficiencia operativa. Las empresas que adoptan prácticas de gestión energética pueden beneficiarse de una reducción significativa en sus costos operativos y una mejora competitiva en el mercado (Torres et al., 2020).

En el contexto colombiano, el Gobierno ha implementado diversas políticas para fomentar la eficiencia energética y el uso de energías re-

novables en las MiPymes. Estas políticas incluyen incentivos fiscales, subsidios y programas de capacitación para apoyar a las empresas en la adopción de tecnologías sostenibles (Ministerio de Minas y Energía, 2022). Sin embargo, la efectividad de estas políticas depende en gran medida de la capacidad de las MiPymes para acceder a la información y los recursos necesarios para implementar cambios significativos en su gestión energética.

En Bogotá, la capital de Colombia, para el 2023 las MiPymes representaron el 99 % del tejido empresarial (Cámara de Comercio, 2023); la adopción de prácticas de eficiencia energética se convierte en una prioridad no solo para reducir costos operativos, sino también para contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible del país (Gómez, 2022).

Pese a la importancia económica de las MiPymes y de acuerdo con Rivera (2020), estas empresas enfrentan desafíos significativos relacionados con la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental, porque operan con márgenes de rentabilidad ajustados, lo que limita su capacidad de invertir en tecnologías energéticamente eficientes. Además, la falta de acceso a financiamiento y a información especializada dificulta la implementación de prácticas sostenibles.

Por tanto, el objetivo de este capítulo es analizar el nivel de conocimiento, comprensión e implementación de mejores prácticas de gestión energética al interior de las MiPymes ubicadas en Bogotá. Así como analizar las políticas públicas vigentes que buscan fomentar prácticas energéticas sostenibles mediante incentivos financieros y apoyo técnico. Para esto, se utilizó una metodología mixta que combina análisis documental y el análisis descriptivo de 429 encuestas cuantitativas aplicadas en MiPymes de Bogotá, para así recopilar datos sobre la percepción y adopción de medidas de eficiencia energética.

El presente capítulo de libro está estructurado en cinco partes después de esta introducción: en la siguiente, se realiza una revisión del contexto, se identifican las políticas gubernamentales relacionadas con la eficiencia energética; posteriormente, se presenta la metodología de investigación, relacionando aspectos como las técnicas de información que se utilizarán, el tipo de investigación, el alcance y la estadística descriptiva; finalmente, se presenta el análisis de los resultados y se plantean las conclusiones y la bibliografía utilizada.

Revisión de la literatura

La gestión energética en las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes) se ha convertido en un área de interés creciente debido a la necesidad de reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental. Las MiPymes representan una parte significativa del tejido empresarial en muchos países, incluida Colombia, donde contribuyen significativamente al empleo y al Producto Interno Bruto (PIB) (Gómez, 2022). Sin embargo, a menudo enfrentan desafíos únicos en la adopción de prácticas de eficiencia energética debido a limitaciones de recursos y conocimiento técnico (Torres et al., 2020).

La gestión energética se refiere al conjunto de prácticas y tecnologías utilizadas para optimizar el consumo de energía en una organización. Incluye la implementación de medidas de eficiencia energética, el monitoreo y la gestión del uso de energía, y la adopción de tecnologías renovables y sostenibles (Smith, 2021). En el contexto de las MiPymes, la gestión energética es crucial para mejorar la competitividad y la sostenibilidad, permitiendo a estas empresas reducir costos operativos y cumplir con las regulaciones ambientales (Johnson y Brown, 2019).

La eficiencia energética se ha identificado como una de las formas más efectivas para que las MiPymes reduzcan sus costos operativos y su huella de carbono. Estudios han demostrado que las empresas que implementan prácticas de eficiencia energética pueden lograr ahorros significativos en sus costos de energía, lo que a su vez mejora su rentabilidad y competitividad (Wang et al., 2018). Además, la eficiencia energética contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Hernández, 2020).

A pesar de los beneficios claros, las MiPymes enfrentan diversas barreras para la implementación de prácticas de eficiencia energética. Estas barreras incluyen la falta de conocimiento técnico, la limitada capacidad financiera para invertir en tecnologías avanzadas, y la falta de acceso a información y recursos necesarios para realizar mejoras significativas (Gómez, 2022).

Un estudio realizado por Torres et al. (2020) en Bogotá encontró que muchas MiPymes no cuentan con personal capacitado en gestión energética, lo que dificulta la identificación e implementación de medidas

de eficiencia. Además, la falta de acceso a financiamiento es una barrera significativa, ya que muchas MiPymes operan con márgenes de beneficio ajustados y no pueden permitirse inversiones iniciales en tecnologías eficientes (Torres et al., 2020).

El gobierno colombiano ha implementado diversas políticas para promover la eficiencia energética en las MiPymes. Estas políticas incluyen incentivos fiscales, subsidios y programas de capacitación diseñados para apoyar a las empresas en la adopción de tecnologías sostenibles (Ministerio de Minas y Energía, 2022). La efectividad de estas políticas depende en gran medida de la capacidad de las MiPymes para acceder a estos recursos y utilizarlos de manera efectiva.

Las políticas gubernamentales exitosas en otros países pueden servir como modelos para mejorar la gestión energética en las MiPymes de Bogotá. Por ejemplo, en Alemania, el programa “KfW Energy Efficiency Program” ofrece préstamos a bajo interés y subvenciones a las pequeñas y medianas empresas para proyectos de eficiencia energética. Este programa ha demostrado ser altamente efectivo, con un gran número de empresas participando y reportando mejoras significativas en su eficiencia energética (Rohde y Heinemann, 2016).

En Japón, el “Energy Conservation Law” requiere que las empresas realicen auditorías energéticas regulares y establezcan planes de mejora. Además, el gobierno proporciona apoyo técnico y financiero para ayudar a las empresas a cumplir con los requisitos. Este enfoque regulatorio, combinado con el apoyo del gobierno, ha resultado en una reducción significativa del consumo de energía en el sector industrial japonés (Yamamoto, 2017).

Para mejorar la eficiencia energética en las MiPymes de Bogotá, es crucial aprender de estas experiencias internacionales y adaptar las mejores prácticas a las condiciones locales. Esto incluye la creación de programas de incentivos financieros accesibles y la provisión de capacitación técnica especializada para el personal de las MiPymes.

La innovación tecnológica juega un papel crucial en la mejora de la eficiencia energética. Las tecnologías emergentes, como los sistemas de gestión de energía basados en inteligencia artificial y las soluciones de energía renovable, ofrecen oportunidades significativas para reducir el consumo de energía y mejorar la sostenibilidad operativa de las MiPymes (Pérez y Sánchez, 2021).

Un estudio realizado por Johnson y Brown (2019) destacó que las empresas que adoptan tecnologías avanzadas de gestión energética pueden lograr reducciones de hasta el 30 % en su consumo de energía. Estas tecnologías incluyen sistemas de monitoreo y control en tiempo real, sensores inteligentes y soluciones de automatización que optimizan el uso de energía en función de las necesidades operativas específicas.

La colaboración con expertos externos y organizaciones de apoyo es esencial para superar las barreras técnicas y financieras que enfrentan las MiPymes. Las asociaciones con universidades, centros de investigación y organizaciones no gubernamentales pueden proporcionar a las empresas el conocimiento y los recursos necesarios para implementar prácticas de eficiencia energética de manera efectiva (Hernández, 2020).

Políticas gubernamentales relacionadas con la energía

Las políticas gubernamentales juegan un papel crucial en la promoción de la eficiencia energética y la sostenibilidad en las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes). Estas políticas no solo proporcionan incentivos financieros y apoyo técnico, sino que también crean un entorno regulatorio que fomenta la adopción de prácticas energéticas sostenibles. Este apartado analiza las políticas gubernamentales relacionadas con la energía a nivel internacional y nacional.

Alemania: KfW Energy Efficiency Program

El “KfW Energy Efficiency Program” en Alemania ofrece préstamos a bajo interés y subvenciones a las PYMES para proyectos de eficiencia energética. Este programa ha sido altamente efectivo, con muchas empresas participando y reportando mejoras significativas en su eficiencia energética (Rohde y Heinemann, 2016). Las empresas que participan en este programa pueden financiar hasta el 100 % de sus proyectos de eficiencia energética, lo que reduce significativamente los costos iniciales.

Japón: Energy Conservation Law

Japón implementó la “Energy Conservation Law”, que exige a las empresas realizar auditorías energéticas regulares y establecer planes de mejora. Además, el gobierno proporciona apoyo técnico y financiero para ayudar a las empresas a cumplir con estos requisitos. Este enfoque ha resultado en una reducción significativa del consumo de energía en el sector industrial japonés (Yamamoto, 2017).

Estados Unidos: Better Buildings Initiative

La “Better Buildings Initiative” en Estados Unidos, lanzada por el Departamento de Energía, tiene como objetivo mejorar la eficiencia energética de los edificios comerciales e industriales. Las empresas participantes reciben asistencia técnica y pueden acceder a financiamiento para proyectos de eficiencia energética. Desde su lanzamiento, el programa ha ayudado a muchas PYMES a reducir sus costos energéticos y mejorar su sostenibilidad (Doe, 2021).

Colombia: Políticas nacionales

En Colombia, el gobierno ha implementado diversas políticas para promover la eficiencia energética y el uso de energías renovables, especialmente en el sector de las MiPymes. Estas políticas están diseñadas para proporcionar apoyo financiero y técnico, así como para crear un entorno regulatorio favorable.

1. Ley 1715 de 2014:

La Ley 1715 de 2014 promueve la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Esta ley establece incentivos fiscales como la deducción de impuestos, la depreciación acelerada de activos y la exención del IVA para la importación de equipos de energía renovable (Ministerio de Minas y Energía, 2022). Esta ley ha sido fundamental para fomentar la inversión en tecnologías energéticamente eficientes y sostenibles.

2. Programa de eficiencia energética en la industria:

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia ha desarrollado programas específicos para mejorar la eficiencia energética en la industria. Estos programas incluyen auditorías energéticas gratuitas para las MiPymes, capacitación técnica y financiamiento para proyectos de eficiencia energética. Según el Ministerio, estas iniciativas han ayudado a muchas empresas a identificar oportunidades de ahorro de energía y a implementar mejoras significativas (Ministerio de Minas y Energía, 2022).

3. Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE):

Este fondo está respaldado por un marco legal que regula su funcionamiento y define las directrices para la asignación de recursos. Este marco incluye la Ley 1715 de 2014, en especial los artículos 8 y 11, que establecen las disposiciones necesarias para integrar las energías renovables no convencionales al sistema energético del país, así como para la promoción de la eficiencia energética. Además, el artículo 12 de la ley crea el FENOGE como un instrumento financiero clave para alcanzar estos objetivos, facilitando la financiación de proyectos en eficiencia energética y energías renovables.

Por tanto, el FENOGE proporciona recursos financieros para proyectos de eficiencia energética y energías renovables en las MiPymes. Ofrece subvenciones y préstamos a bajo interés para apoyar la implementación de proyectos energéticamente eficientes. Desde su creación, el FENOGE ha financiado numerosos proyectos en diversas regiones de Colombia, contribuyendo a la reducción del consumo de energía y a la promoción de prácticas sostenibles (FENOGE, 2023).

4. Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá (POT):

El POT de Bogotá vigente para 2024, incluye disposiciones que promueven la construcción de edificaciones sostenibles, establece directrices para promover el uso de energías renovables como la solar, eólica y

biomasa en la ciudad. Se incentiva la instalación de paneles solares en edificaciones y la integración de tecnologías que aprovechen fuentes renovables en los nuevos desarrollos urbanos.

Además, se plantean medidas para mejorar la eficiencia energética en la infraestructura urbana, incluyendo la promoción de edificaciones sostenibles que reduzcan el consumo energético y aumenten el uso de energías limpias, e incluye la necesidad de sensibilizar a la población sobre la importancia del uso de energías renovables y de involucrar a las comunidades en los proyectos de energía sostenible.

Metodología

La metodología de este estudio se basa en una combinación de revisión de literatura y trabajo de campo mediante encuestas. El objetivo principal es analizar la gestión energética en las micro, pequeñas y medianas Empresas (MiPymes) de Bogotá y revisar las políticas gubernamentales en la adopción de prácticas de eficiencia energética.

Para contextualizar el estudio, se realizó una revisión de la literatura que abarca investigaciones previas sobre la gestión energética y la sostenibilidad en MiPymes. Esta revisión incluyó estudios nacionales e internacionales que destacan las mejores prácticas, barreras y oportunidades en la implementación de medidas de eficiencia energética. Se consultaron artículos académicos, informes gubernamentales y publicaciones especializadas en sostenibilidad empresarial y políticas energéticas.

La revisión de la literatura permitió identificar las principales áreas de interés y las brechas de conocimiento existentes. Asimismo, se utilizaron los hallazgos de estudios previos para diseñar el cuestionario de la encuesta y orientar el análisis de los datos recopilados. Entre las fuentes clave se encuentran estudios sobre políticas de eficiencia energética en Alemania, Japón y Estados Unidos, así como investigaciones sobre la implementación de prácticas sostenibles en las MiPymes colombianas (Gómez, 2022; Ministerio de Minas y Energía, 2022; Rohde y Heine- mann, 2016).

El trabajo de campo se centró en la aplicación de una encuesta detallada a las MiPymes en Bogotá. La encuesta, diseñada para este estudio,

constaba de 143 preguntas sobre varios aspectos de la sostenibilidad empresarial, destacando la gestión energética. El cuestionario incluía preguntas sobre la conciencia y el conocimiento de las oportunidades de eficiencia energética, las prácticas actuales de gestión energética, las barreras enfrentadas y la influencia de las políticas gubernamentales.

La muestra del estudio incluyó 429 MiPymes de diversos sectores económicos en Bogotá. La selección de las empresas se realizó de manera aleatoria para garantizar la representatividad de los resultados. En la Tabla 1 se presentan algunas características de las empresas que participaron en el estudio. Se evidencia que más del 60 % eran pequeñas empresas, el 26 % medianas empresas, y la menor representación se encuentra en las microempresas. Con relación al sector donde opera la empresa, se evidencio que más de la mitad de las empresas encuestadas pertenecían al sector de servicios, seguido del sector de comercio con un 29 % y en el sector de manufactura, el porcentaje fue del 16 %.

También se consideró el número de empleados a tiempo completo que laboraron en el último año en las empresas encuestas, el 59 % reporto tener entre 1 y 10 empleados. Es importante aclarar que para Colombia, los resultados del número de empleados podrían estar en contradicción frente a la clasificación de las empresas, es ahí, donde se demuestra la importancia de utilizar la Unidad de Valor Tributario - UVT como criterio de clasificación para micro, pequeña y mediana empresa, de acuerdo con el Decreto 957 de 2019 del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, dado que, hay organizaciones con bajos niveles de empleabilidad pero con altos niveles de ingresos por actividades ordinarias y responsabilidades tributarias.

Tabla 1. Caracterización de la muestra

Fuente: Elaboración propia (2024). Resultados cuestionario Integración del Desarrollo Sostenible en MiPymes - UNIMINUTO

Clasificación de las empresas		
	Frecuencia	Porcentaje
Microempresa	50	12 %
Pequeña empresa	264	62 %
Mediana empresa	115	26 %
Total	429	100 %
Sector al que pertenece la empresa		
	Frecuencia	Porcentaje
Comercio	124	29 %
Manufacturero	71	16 %
Servicios	234	55 %
Total	429	100 %
Número de empleados laborando a tiempo completo en el último año		
	Frecuencia	Porcentaje
0 (Yo soy mi propio empleado)	71	17 %
De 1 a 10	254	59 %
De 11 a 30	54	13 %
De 31 a 50	14	3 %
De 51 a 100	13	3 %
De 101 a 250	7	2 %
251+	16	4 %
Total	429	100 %

De las 143 preguntas de la encuesta, una sección específica se centró en la gestión energética y el impacto de las políticas gubernamentales. Esta sección incluyó preguntas sobre el conocimiento y la implementación de prácticas de eficiencia energética, el acceso a recursos y apoyo técnico, y la percepción de las políticas gubernamentales relacionadas con la energía.

Es importante destacar algunas limitaciones del estudio. La muestra de 429 MiPymes, aunque representativa, no incluye todas las empresas

de Bogotá, lo que puede limitar la generalización de los resultados. Además, la precisión de los datos depende de la veracidad de las respuestas proporcionadas por los encuestados.

Análisis de datos

El análisis de datos es una parte fundamental del estudio, ya que permite comprender las prácticas de gestión energética en las MiPymes de Bogotá y evaluar el impacto de las políticas gubernamentales. A continuación, se presentan los principales hallazgos respaldados por gráficas que ilustran las tendencias y relaciones clave.

Análisis descriptivo

El análisis descriptivo muestra una visión de las percepciones y prácticas de las MiPymes sobre la eficiencia energética. En la Figura 1 se evidencia el nivel de consciencia de oportunidades de mejora en eficiencia energética que los líderes de las MiPymes perciben. Los resultados muestran que una proporción significativa de empresas (44 %) tenía una consciencia alta (niveles 3), lo que indica que en muchas MiPymes se reconoce la importancia de la eficiencia energética. Sin embargo, también hay una cantidad significativa de empresas con baja y moderada consciencia (niveles 1 y 2), lo que sugiere la necesidad de campañas de sensibilización más efectivas y programas de capacitación que puedan aumentar el nivel de conocimiento y percepción sobre la eficiencia energética. Aún queda trabajo por hacer para mover más empresas hacia niveles más altos de percepción. Es fundamental que las estrategias de intervención se enfoquen en educar a estas empresas sobre los beneficios económicos y ambientales de la gestión eficiente de la energía, así como proporcionar herramientas y recursos para implementar estas prácticas.

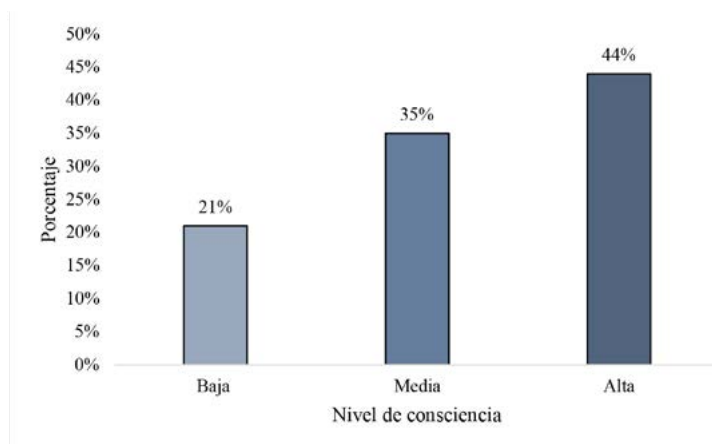


Figura 1. Consciencia de oportunidades de mejora en Eficiencia Energética Elaboración propia (2024). Resultados cuestionario Integración del Desarrollo Sostenible en MiPymes - UNIMINUTO

En la Figura 2 se muestra el nivel de comprensión por parte de los líderes de las MiPymes acerca de los costos energéticos. La mayoría de las respuestas se encuentran en el nivel 2 y 3, lo que indica un conocimiento moderado y alto sobre los costos de energía. Esto sugiere que muchas empresas tienen una idea general de cuánto gastan en energía, pero quizás no tengan un entendimiento profundo de cómo optimizar estos costos.

Esta distribución indica una oportunidad para mejorar el conocimiento técnico y financiero de las MiPymes en relación con la energía. Programas específicos de formación y asesoría pueden ayudar a estas empresas a entender mejor sus patrones de consumo energético y a identificar áreas donde pueden implementar mejoras para reducir costos. El objetivo sería mover más empresas hacia niveles más altos de comprensión, donde puedan tomar decisiones informadas y estratégicas sobre la gestión de sus recursos energéticos.

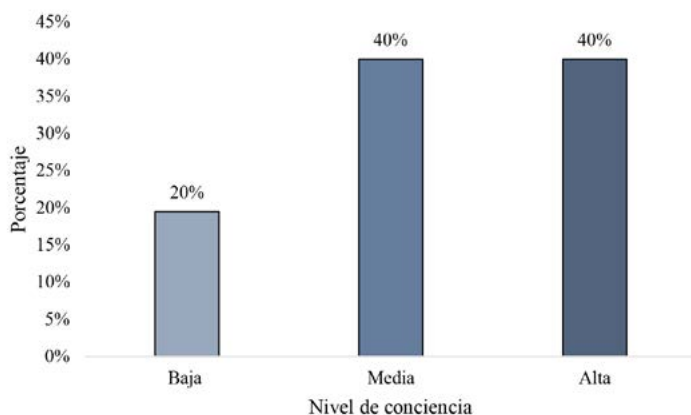


Figura 2. *Comprensión de Costos Energéticos. Elaboración propia (2024). Resultados cuestionario Integración del Desarrollo Sostenible en MiPymes - UNIMINUTO*

La Figura 3, grafico de cajas y bigotes que compara el conocimiento de mejores prácticas por tamaño de la empresa revela diferencias significativas entre micro, pequeñas y medianas empresas. Las medianas empresas tienden a tener un mayor conocimiento sobre las mejores prácticas en eficiencia energética en comparación con las microempresas. Este hallazgo es consistente con la idea de que las medianas empresas generalmente tienen más recursos y capacidad para invertir en formación y tecnología avanzada.

Las microempresas, al tener menos recursos, pueden enfrentarse a barreras más significativas para acceder a la información y la capacitación necesaria para mejorar su eficiencia energética. Este gráfico destaca la necesidad de políticas y programas específicos que apoyen a las micro y pequeñas empresas en la adquisición de conocimientos y tecnologías de eficiencia energética. Iniciativas como subvenciones, programas de capacitación accesibles y asesoría técnica pueden ayudar a nivelar el campo de juego y permitir que incluso las empresas más pequeñas se beneficien de prácticas de gestión energética eficientes.

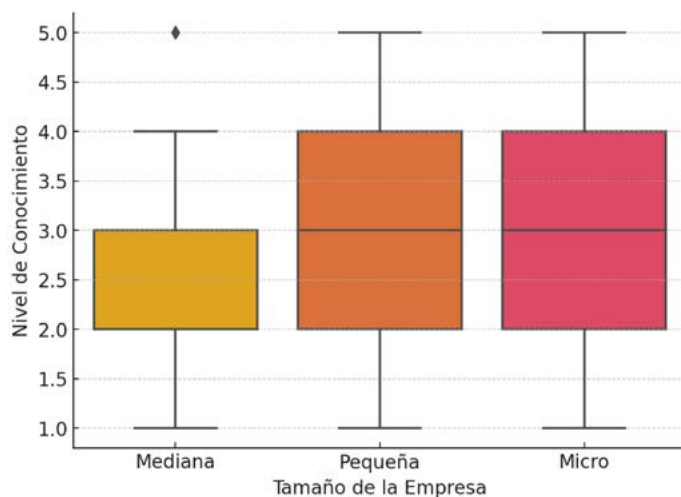


Figura 3. Conocimiento de Mejores Prácticas por Tamaño de la Empresa. Elaboración propia (2024). Resultados cuestionario Integración del Desarrollo Sostenible en MiPymes - UNIMINUTO

Análisis inferencial

El análisis inferencial explora las relaciones entre variables y evalúa el impacto de las políticas gubernamentales.

El mapa de calor de correlaciones proporciona una visión clara de cómo diferentes variables relacionadas con la gestión energética están interconectadas. Por ejemplo, la fuerte correlación positiva entre la influencia de agencias gubernamentales y el conocimiento de mejores prácticas sugiere que las políticas y programas gubernamentales son efectivos en la difusión de información técnica entre las MiPymes. Esto implica que fortalecer y expandir estos programas podría continuar mejorando el conocimiento y la adopción de prácticas de eficiencia energética.

Asimismo, la correlación entre el acceso a financiamiento y la implementación de prácticas de eficiencia energética subraya la importancia del apoyo financiero para estas empresas. Las MiPymes que tienen acceso a recursos financieros adecuados están mejor posicionadas para invertir en tecnologías y prácticas que mejoren su eficiencia energética. Por lo tanto,

aumentar la disponibilidad de financiamiento y simplificar el acceso a estos recursos puede tener un impacto significativo en la adopción de medidas de eficiencia energética.

En conjunto, estos análisis destacan áreas clave donde se pueden enfocar las intervenciones para mejorar la gestión energética en las MiPymes de Bogotá. Mejorar la educación y el conocimiento técnico, proporcionar apoyo financiero y fortalecer las políticas gubernamentales son estrategias esenciales para fomentar la sostenibilidad y la eficiencia energética en este sector crítico de la economía.

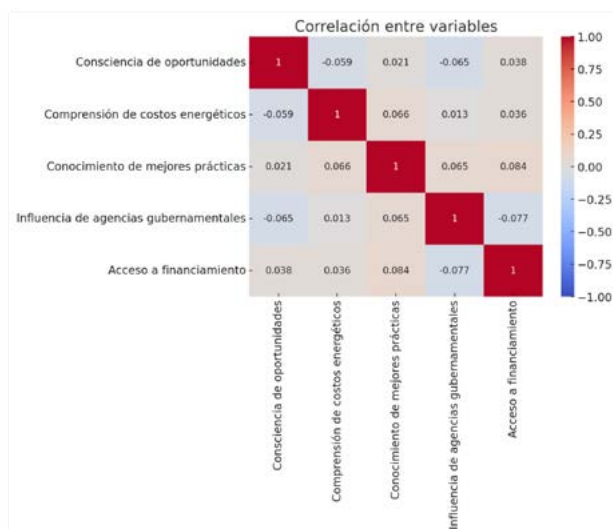


Figura 4. Mapa de Calor de Correlación entre Variables. Elaboración propia (2024). Resultados cuestionario Integración del Desarrollo Sostenible en MiPymes - UNIMI-NUTO

Discusión

La discusión de los resultados de este estudio sobre la gestión energética en las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPymes) de Bogotá revela insights cruciales sobre las barreras y oportunidades para mejorar la eficiencia energética en este sector. Los datos de la encuesta, junto con ejemplos y datos de políticas internacionales y nacionales, ofrecen una

comprensión profunda de cómo las políticas gubernamentales pueden influir en la adopción de prácticas sostenibles.

Barreras para la Implementación de Prácticas de Eficiencia Energética: Los datos de la encuesta indican que una de las principales barreras para la implementación de prácticas de eficiencia energética en las MiPymes de Bogotá es la falta de conocimiento técnico. Solo un 35 % de las MiPymes conoce las mejores prácticas y tecnologías para reducir el consumo de energía. Este hallazgo es consistente con estudios previos que destacan la importancia del conocimiento técnico para la adopción de medidas de eficiencia energética (Gómez, 2022).

La falta de acceso a financiamiento también se identificó como una barrera significativa. Muchas MiPymes operan con márgenes de beneficio ajustados y no pueden permitirse las inversiones iniciales en tecnologías eficientes. Los programas como el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) y los incentivos fiscales de la Ley 1715 son cruciales para superar esta barrera, pero es necesario mejorar el acceso y la disponibilidad de estos recursos (Ministerio de Minas y Energía, 2022).

Además, las barreras administrativas y la burocracia pueden dificultar el acceso a los programas de incentivos y financiamiento. Simplificar estos procesos podría aumentar la participación de las MiPymes en programas de eficiencia energética y facilitar la adopción de prácticas sostenibles (Smith, 2021).

Impacto de las políticas gubernamentales: Las políticas gubernamentales han demostrado tener un impacto positivo en la adopción de prácticas de eficiencia energética entre las MIPYMES. Un 40 % de las MiPymes reporta una fuerte influencia de las agencias gubernamentales que proporcionan apoyo y experiencia. Este hallazgo sugiere que los programas gubernamentales que ofrecen capacitación técnica y asesoría son efectivos para aumentar el conocimiento y la adopción de prácticas sostenibles.

Por ejemplo, el programa de eficiencia energética en la industria desarrollado por el Ministerio de Minas y Energía ha ayudado a muchas empresas a identificar oportunidades de ahorro de energía y a implementar mejoras significativas. Las auditorías energéticas gratuitas y la capaci-

tación técnica proporcionada por este programa han sido especialmente útiles para las MiPymes, que a menudo carecen de los recursos necesarios para realizar estas evaluaciones por su cuenta (Ministerio de Minas y Energía, 2022).

Los incentivos financieros, como los proporcionados por el FENOGÉ y la Ley 1715, también han sido fundamentales para facilitar la implementación de proyectos de eficiencia energética. Sin embargo, la efectividad de estos incentivos depende de la capacidad de las MiPymes para acceder a ellos. Mejorar la comunicación y el acceso a la información sobre estos programas puede aumentar su impacto y fomentar una mayor adopción de prácticas sostenibles.

Recomendaciones políticas para mejorar la eficiencia energética en las MiPymes de Bogotá

A partir de los hallazgos y considerando las percepciones de los empresarios sobre las barreras y oportunidades para la eficiencia energética en las MiPymes de Bogotá y las experiencias internacionales exitosas, se pueden formular recomendaciones políticas fundadas para mejorar la gestión energética en el sector. Estas recomendaciones no solo buscan impactar positivamente a las MiPymes de Bogotá, sino que también podrían servir como base para la implementación a nivel nacional en Colombia.

1. Fortalecimiento de la capacitación técnica y el apoyo asesor especializado

La capacitación técnica y el asesoramiento son pilares fundamentales para superar las barreras de conocimiento que limitan la adopción de medidas de eficiencia energética. Basándose en experiencias internacionales, como el “KfW Energy Efficiency Program” en Alemania, que incluye un componente fuerte de asesoramiento técnico, se recomienda incrementar la inversión en programas de formación específica para MiPymes. Estos programas deben estar diseñados para abordar las necesidades particulares de las empresas en diferentes sectores, asegurando que sean accesibles

tanto en términos de costo como de disponibilidad geográfica (Bank aus Verantwortung | KfW) (Bank aus Verantwortung | KfW).

2. Mejora de la comunicación y acceso a la información sobre incentivos y financiamiento

Uno de los principales obstáculos identificados es la falta de información clara y accesible sobre los programas de incentivos y financiamiento. La experiencia de otros países muestra que la creación de plataformas centralizadas puede ser una solución efectiva. Por ejemplo, en España, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) gestiona una plataforma digital que centraliza toda la información sobre subvenciones y ayudas disponibles. Para Bogotá, se recomienda la implementación de una plataforma similar que facilite el acceso a información detallada sobre cómo las MiPymes pueden beneficiarse de los incentivos disponibles, aumentando así su participación y efectividad (Clean Energy Islands).

3. Simplificación de los procesos administrativos

La burocracia y la complejidad administrativa son barreras significativas para las MiPymes cuando intentan acceder a incentivos fiscales y financiamiento para eficiencia energética. Siguiendo el ejemplo de la simplificación administrativa implementada en Dinamarca, se propone digitalizar todos los trámites y crear ventanillas únicas que centralicen y simplifiquen las solicitudes. Esta estrategia ha demostrado ser eficaz en reducir el tiempo y los costos asociados con la implementación de medidas de eficiencia energética en las pequeñas y medianas empresas, mejorando la tasa de adopción (Bank aus Verantwortung | KfW).

4. Fomento de la colaboración público-privada

La colaboración entre el sector público y privado es esencial para ampliar el alcance y efectividad de las políticas de eficiencia energética. Experiencias como las asociaciones en Finlandia entre el gobierno, universidades y empresas privadas han resultado en el desarrollo de tecnologías

innovadoras y la implementación de proyectos piloto que sirven como modelos a seguir. En Bogotá, se recomienda fomentar alianzas similares, involucrando a universidades, centros de investigación, organizaciones no gubernamentales y el sector privado para proporcionar el apoyo técnico y financiero necesario a las MiPymes (Bank aus Verantwortung | KfW).

Conclusiones

Las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (MiPymes) en Bogotá representan un sector crucial de la economía local, y la gestión energética eficaz es esencial para su sostenibilidad y competitividad. Este estudio ha explorado las prácticas actuales de gestión energética, las barreras enfrentadas y el impacto de las políticas gubernamentales en la adopción de prácticas de eficiencia energética. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de los hallazgos del estudio, así como recomendaciones para mejorar la eficiencia energética en las MiPymes de Bogotá.

Conciencia de oportunidades de mejora en eficiencia energética: Un hallazgo significativo es que la mayoría de las MiPymes en Bogotá tienen una consciencia moderada a alta sobre las oportunidades de mejora en la eficiencia energética. Esta alta consciencia sugiere que las campañas de sensibilización y los esfuerzos gubernamentales para promover la eficiencia energética han sido efectivos hasta cierto punto. Sin embargo, la existencia de un grupo considerable de empresas con baja consciencia indica que aún hay trabajo por hacer para alcanzar a todas las MiPymes.

Comprensión de costos energéticos: El estudio también reveló que muchas MiPymes entienden bien los costos energéticos, aunque existe margen para mejorar. Este conocimiento es fundamental para la implementación de medidas de eficiencia energética, ya que permite a las empresas identificar áreas de mejora y evaluar el impacto de las inversiones en tecnología eficiente. Las empresas que entienden sus costos energéticos están en una mejor posición para tomar decisiones informadas sobre la gestión de sus recursos.

Conocimiento de mejores prácticas y tecnologías: Una de las áreas más preocupantes identificadas en el estudio es la falta de conocimiento técnico sobre las mejores prácticas y tecnologías para la eficiencia ener-

gética. Solo el 35 % de las MiPymes en Bogotá conoce estas prácticas, lo que representa una barrera significativa para la adopción de medidas de eficiencia energética. Esta brecha en el conocimiento técnico subraya la necesidad de programas de capacitación y apoyo técnico más robustos.

Influencia de las agencias gubernamentales: El impacto de las políticas gubernamentales en la adopción de prácticas de eficiencia energética es evidente en los datos. Un 40 % de las MiPymes reporta una fuerte influencia de las agencias gubernamentales que proporcionan apoyo y experiencia. Este hallazgo sugiere que los programas gubernamentales que ofrecen capacitación técnica y asesoría son efectivos para aumentar el conocimiento y la adopción de prácticas sostenibles.

Acceso a financiamiento: La falta de acceso a financiamiento sigue siendo una barrera significativa para muchas MiPymes. Los programas como el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGÉ) y los incentivos fiscales de la Ley 1715 son cruciales para superar esta barrera, pero es necesario mejorar el acceso y la disponibilidad de estos recursos. Muchas empresas operan con márgenes de beneficio ajustados y no pueden permitirse las inversiones iniciales en tecnologías eficientes sin apoyo financiero adecuado.

Conocimiento técnico: La falta de conocimiento técnico es una de las principales barreras para la implementación de prácticas de eficiencia energética. Las MiPymes necesitan acceso a información actualizada y relevante sobre las mejores prácticas y tecnologías disponibles. Los programas de capacitación deben ser accesibles y diseñados para satisfacer las necesidades específicas de estas empresas.

Acceso a financiamiento: El acceso a financiamiento es otro desafío crítico. Los programas de incentivos y financiamiento deben ser más accesibles y estar mejor comunicados a las MiPymes. Simplificar los procesos administrativos y reducir la burocracia puede facilitar la participación de las empresas en estos programas.

Barreras administrativas: Las barreras administrativas y la burocracia pueden dificultar el acceso a los programas de incentivos y financiamiento. Simplificar estos procesos podría aumentar la participación de las MiPymes en programas de eficiencia energética y facilitar la adopción de prácticas sostenibles.

Agradecimientos: Este capítulo de libro de investigación derivado del proyecto PF23-025 “La sostenibilidad como motor de cambio empresarial: Un análisis comparativo de prácticas adoptadas por MiPymes en Colombia y México”. Financiado por la Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO.

Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá, (2021). *Decreto 555. Por el cual se adopta la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.*
- Courrent JM, Labelle F, Spence M. (2013). *International survey on sustainable development in SMEs: questionnaire*
- Doe, J. (2021). Better Buildings Initiative: Promoting energy efficiency in SMEs. *Energy Policy*, 42(3), 567-579. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.03.021>
- FENOGE. (2023). *Informe Anual de Actividades*. FENOGE. <https://fenoge.gov.co/informe-anual-2023>
- Gómez, A. (2022). Sostenibilidad y eficiencia energética en las MIPY-MES colombianas. *Revista de Economía y Empresa*, 14(2), 45-60. <https://doi.org/10.3390/sustainability14020456>
- Hernández, L. (2020). Innovación tecnológica y eficiencia energética en MIPYMES. *Journal of Environmental Management*, 12(3), 112-130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.05.030>
- Johnson, T., & Brown, M. (2019). Implementing energy efficiency in small and medium-sized enterprises: Barriers and solutions. *Energy Policy*, 38(8), 486-494. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.05.019>
- Ministerio de Minas y Energía. (2022). *Políticas energéticas y sostenibilidad en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía. <https://www.minenergia.gov.co/politicas-energeticas-2022>
- Mejía Salazar, I., & Ayala Soto, S. (2023). Revisión de literatura sobre gestión de cadenas de suministro sostenibles e innovaciones disruptivas en Pymes. *Revista Universidad & Empresa*, 25(44), 1-35. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.12734>
- Pelekais, E. A., & Carvajalino, D. V. O. (2020). Rendimiento empresarial sostenible para las micro, pequeñas y medianas empresas en Colombia.

- Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo*, 2(7), 104-118. <https://doi.org/10.21500/23825014.4955>
- Perez, J., & Sánchez, M. (2021). Advancements in energy management technology for SMEs. *International Journal of Energy Research*, 45(6), 2334-2350. <https://doi.org/10.1002/er.5960>
- Rohde, C., & Heinemann, C. (2016). Energy efficiency programs for SMEs: An overview of successful examples. *Energy Efficiency*, 9(5), 915-927. <https://doi.org/10.1007/s12053-016-9406-9>
- Smith, R. (2021). Energy management practices in small businesses. *Journal of Small Business Management*, 59(2), 243-257. <https://doi.org/10.1080/00472778.2021.1923281>
- Wicki, S. y Hansen, E. G. (2019). Green technology innovation: Anatomy of exploration processes from a learning perspective. *Business Strategy and the Environment*, 28 (14), 70-88. <https://doi.org/10.1002/bse.2295>
- Yamamoto, K. (2017). Energy Conservation Law and its impact on industrial energy efficiency in Japan. *Journal of Energy Policy*, 35(4), 233-245. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.019>

Capítulo 4

Edificios inteligentes: el papel de la IA en la transición energética y en el cambio de conducta del ciudadano

Alberto Coronado-Mendoza¹

alberto.coronado@academicos.udg.mx

Israel Guadalupe Hernández Villaseñor¹

israel.hernandez7728@alumnos.udg.mx

Ángel Oswaldo Gama Camacho¹

angel.gama@alumnos.udg.mx

Luis Manuel Sapien Macías¹

luis.sapien3322@alumnos.udg.mx

Jesús Octavio Quezada Rosas¹

joqr231210@gmail.com

<https://doi.org/10.61728/AE20251987>



¹ Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara.

Resumen

El presente capítulo establece algunas bases para la creación de una nueva cultura energética al interior de las organizaciones, donde los usuarios de los edificios, al estar informados en tiempo real sobre la huella de carbono que generan sus actividades diarias, pueden emprender acciones para su mitigación, asistidos por inteligencia artificial. Primeramente, se presenta cómo el cambio climático está estrechamente relacionado con la demanda de energía eléctrica a partir de la quema de combustibles fósiles. Se presentan algunos datos relevantes sobre la generación de energía en México y su consumo en el Área Metropolitana de Guadalajara. Posteriormente, se dan algunos conceptos sobre ciudades y edificios inteligentes, internet de las cosas y cómo la inteligencia artificial puede ser utilizada para predecir la demanda energética de estas edificaciones, así como de la generación fotovoltaica que se tendrá en días posteriores, con la finalidad de que el usuario esté informado y pueda tomar decisiones para cambiar sus hábitos de consumo. Finalmente, se presentan los avances del proyecto implementado en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara, donde, a través del monitoreo de energía en tiempo real, tanto de generación del sistema fotovoltaico de 499 kWp como del consumo de los edificios universitarios, se promueve la figura del prosumidor y la carbono neutralidad.

Introducción

Cada año, las consecuencias del cambio climático se hacen más evidentes. Las catástrofes climáticas están presentes en nuestros territorios: incendios, inundaciones, sequías, temperaturas extremas, entre otros. La humanidad es la principal responsable del calentamiento global, derivado de la emisión de gases de efecto invernadero. Según las estadísticas, los edificios contribuyen en un 38 % del total de emisiones de CO₂ (ONU, 2020). La energía que se utiliza en México, como se muestra en la Fi-

gura 1, proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles, en aproximadamente un 70 % (PRODESEN, 2023).

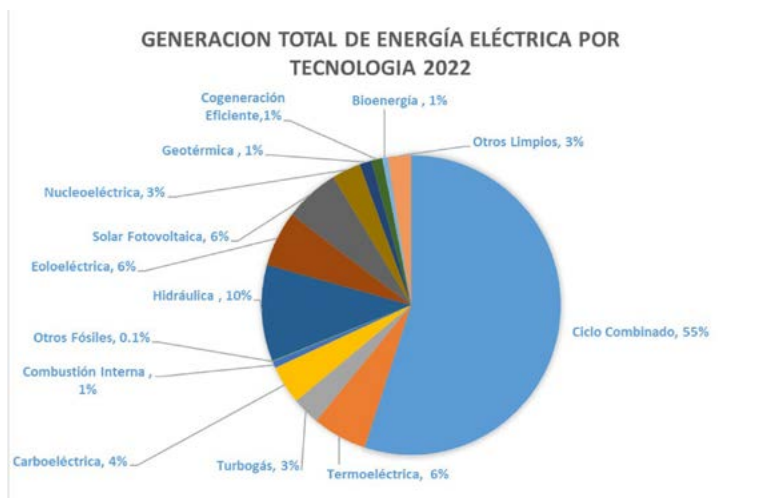


Figura 1. Mezcla energética de México al 2022.

Fuente: Elaboración propia con datos de CENACE, CRE Y CFE. *Otros fósiles incluyen cogeneración de abasto aislado e importaciones. ** Otros limpios incluyen Frenos regenerativos, Energía libre de combustible fósil, Energía adicional por enfriamiento auxiliar y Baterías.

En relación al consumo final de energía, la figura 2 muestra que la empresa mediana es la principal consumidora de energía con el 37.1 % en 2023 y la proyección es que esta crecerá al 28.1 % en 2037. Enseguida están el sector residencial y la gran industria con el 25 % aproximadamente.

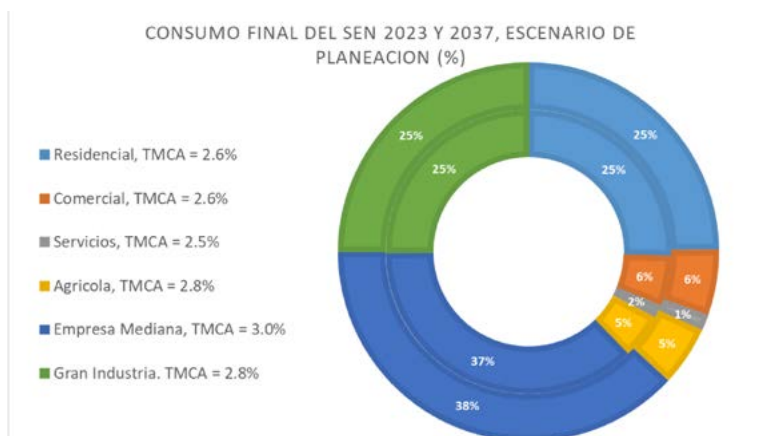


Figura 2. Consumo final del Sistema Eléctrico Nacional 2023 y 2037, escenario de planeación (%).

Fuente: Elaboración propia con datos del CENACE (PRODESEN, 2023).

Las afectaciones del cambio climático se están dando en toda la Zona Metropolitana de Guadalajara, y el Municipio de Tlajomulco de Zúñiga no es la excepción. En los últimos años, Tlajomulco ha experimentado un crecimiento económico debido, entre otras razones, a la instalación de zonas industriales, así como al desarrollo de zonas habitacionales, donde este municipio creció de un 3 % en el año 2000 a un 29 % registrado en el año 2020 (ver tabla 1). Esto ha traído como consecuencia retos en movilidad y demanda energética, lo cual se ve reflejado en un incremento en emisiones de gases de efecto invernadero.

En la Figura 3 se presentan las diferentes fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de cada uno de los municipios que conforman el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). Ocupando el primer lugar, Zapopan; luego Guadalajara, y Tlajomulco de Zúñiga se encuentra en tercer lugar, donde el transporte es la principal causa, enseguida de la energía estacionaria. A nivel del AMG, cada habitante tiene una huella de carbono de 3.3 toneladas de CO_{2e}.

Tabla 1. Variación porcentual de habitantes por municipio.

Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda del INEGI 2020.

Municipio	Año	
	2000	2020
Guadalajara	45 %	27 %
Zapopan	27 %	29 %
Tonalá	9 %	11 %
Tlaquepaque	13 %	14 %
Tlajomulco	3 %	29 %
El Salto	2 %	5 %

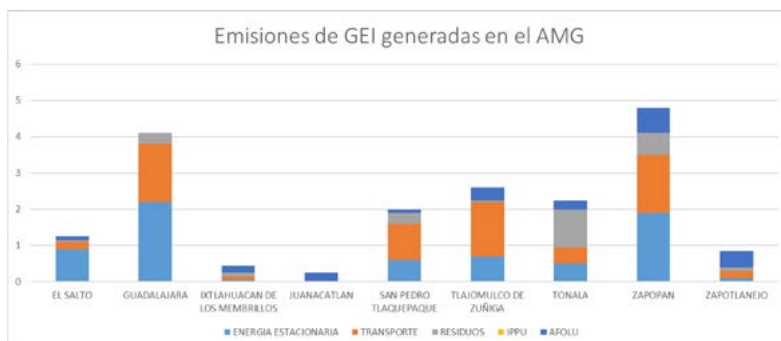


Figura 3. Emisiones de GEI generadas en el AMG.

Fuente: Elaboración propia con información de (PACmetro, 2020).

El sector de energía estacionaria fue el que más emisiones generó con 6.9 MtCO_{2e}, lo que equivale a una aportación del 43 % (ver Figura 3). Las emisiones provienen de la quema de combustible, así como de las emisiones fugitivas liberadas en el proceso de generación, entrega y consumo de formas útiles de energía (como electricidad o calor).

Tabla 2. Emisiones totales por subsector para el sector de la Energía estacionaria en el AMG.

Fuente: Elaboración propia con datos del PACmetro 2020.

Sector Energía estacionaria 6.9 MtCO _{2e} 43 %	Edificios residenciales	44 %
	Edificios e instalaciones comerciales	43 %
	Industrias manufactureras	12 %

Como se muestra en la Tabla 2, el AMG emite anualmente 16.1 millones de toneladas de CO_{2e}, distribuyéndose en energía estacionaria con 6.9 MtCO_{2e} (43 %), luego le sigue el transporte con 6.2 MtCO_{2e} (39%), y el sector residuos con 2.9 MtCO_{2e} (18 %).

Transición energética

La transición energética mundial es un proceso que busca cambiar el modelo de producción y consumo de energía hacia uno más sostenible, eficiente y respetuoso con el medioambiente. Esta transición es impulsada por la necesidad de abordar desafíos globales como el cambio climático, la seguridad energética y la contaminación ambiental. Implica la adopción de fuentes de energía renovable, la mejora de la eficiencia energética, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la promoción de tecnologías limpias.

La historia de la transición energética mundial se remonta a décadas atrás, pero ha ganado impulso significativo en las últimas dos o tres décadas, a medida que se ha intensificado la conciencia sobre los impactos negativos del uso predominante de combustibles fósiles. La creciente preocupación por el cambio climático, resultado principalmente de la quema de carbón, petróleo y gas natural, ha llevado a un creciente consenso internacional sobre la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La transición energética se ha acelerado gracias a los avances tecnológicos en energías renovables como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y de biomasa, así como en tecnologías de almacenamiento de energía y redes inteligentes. Estos avances han hecho que las energías

renovables sean más competitivas en términos de costo y confiabilidad, lo que ha impulsado su adopción a gran escala en muchos países.

En el caso específico de México, la transición energética ha sido un tema relevante en los últimos años. México ha sido tradicionalmente dependiente del petróleo como fuente principal de energía y ha enfrentado desafíos en términos de seguridad energética, así como de contaminación ambiental debido a la explotación y refinación de este recurso.

Sin embargo, en los últimos años, México ha comenzado a diversificar su matriz energética, promoviendo activamente la adopción de energías renovables y la mejora de la eficiencia energética (SENER, 2018). Se han implementado políticas y regulaciones para fomentar la inversión en energías limpias (CONUEE, 2014), se han establecido objetivos ambiciosos de generación de energía renovable (Ley de Transición Energética, 2015) y se han llevado a cabo subastas para la contratación de proyectos de energía renovable a gran escala (COPARMEX, 2023).

Además, México cuenta con un gran potencial para la generación de energía solar y eólica debido a sus condiciones geográficas favorables, lo que ha contribuido al rápido crecimiento de estas tecnologías en el país. La Ley de Transición Energética y la Ley de Transición a Energías Limpias son ejemplos de iniciativas legislativas que buscan promover una transición hacia un sistema energético más sostenible y limpio en México.

A pesar de estos avances, México todavía enfrenta desafíos en su transición energética, como la necesidad de mejorar la infraestructura de transmisión y distribución de energía, abordar la intermitencia de las energías renovables y garantizar una transición justa para las comunidades y trabajadores afectados por el cambio hacia un modelo energético más sostenible.

A nivel del Área Metropolitana de Guadalajara, se formuló el Plan de Acción Climática, o PACmetro, donde uno de sus objetivos es conseguir una metrópoli carbono neutral basada en la gestión integral de los residuos, la movilidad masiva y no motorizada, el uso eficiente de la energía y el suministro de energía renovable. (PACmetro, 2020). En resumen, la transición energética mundial es un proceso que busca transformar el sistema energético global hacia uno más sostenible y limpio, impulsado

por la necesidad de abordar los desafíos ambientales y climáticos. En México, este proceso ha sido un tema relevante en los últimos años, con esfuerzos significativos para diversificar la matriz energética y promover el uso de energías renovables. Sin embargo, todavía existen desafíos que deben superarse para lograr una transición exitosa hacia un futuro energético más sostenible.

Ciudades y edificios inteligentes

Existen en la actualidad dos tendencias importantes para la transición energética de las ciudades: ciudades inteligentes y edificios inteligentes. A continuación, se dan algunos detalles sobre estos dos conceptos. Las ciudades inteligentes son aquellas que conectan e integran los diferentes servicios, tecnologías, infraestructura, sustentabilidad y calidad de vida en beneficio de cada habitante para una mejor optimización de los recursos y necesidades de las descendencias futuras, formando un sistema robusto.

Algunas características de ciudades inteligentes son:

- Movilidad urbana
- Conectividad
- Sustentabilidad ambiental
- Sostenibilidad
- Gobernanza

En otras palabras, la ciudad inteligente es aquella que establece las mejores experiencias para cada uno de sus habitantes. Utilizando recursos renovables como la energía, reutilizando el uso del agua, implementando servicios de movilidad, infraestructura para su conectividad y administración eficiente.

Tal como lo señala la Organización de las Naciones Unidas, las ciudades y las áreas metropolitanas son centros neurálgicos de crecimiento económico, ya que contribuyen al 60 % del PIB mundial. Sin embargo, también representan el 70 % de las emisiones de carbono y más del 60% del uso de recursos.

Algunos elementos para el funcionamiento son:

- Detectores
- Sensores

- Captadores
- Luces
- Análisis de datos
- Unidad central

Estos dispositivos son esenciales para su administración, movimiento y sobre todo la captación de la información y análisis de datos. Todo esto con la única finalidad de que los quehaceres del día a día sean más seguros y eficientes en sus diferentes servicios.

Como indica Caird (2018), Los hallazgos ejemplifican las prácticas, los desafíos y las recomendaciones de evaluación e información de las ciudades contemporáneas para apoyar el desarrollo urbano inteligente.

Según los ciudadanos asocian la ciudad inteligente a la tecnología, la eficiencia y la mejora de su calidad de vida, centrándose en los problemas actuales: una ciudad humana con tecnología centrada en los ciudadanos. De esta manera, la ciudad actúa como un verdadero socio del ciudadano, dispuesta a reforzar la calidad de vida urbana y el entorno vital con diálogo y cocreación.

Además, Caird, Hudson y Kortuem, (2016) especifica que las tecnologías inteligentes crean nuevas oportunidades para una variedad de programas de desarrollo y regeneración de ciudades inteligentes diseñados para abordar los desafíos ambientales, económicos y sociales concentrados en las ciudades.

Los Edificios Inteligentes son aquellas infraestructuras dotada de diferentes sistemas con tecnología de última generación para la mejora y optimación de los diferentes procesos, en beneficio del desecho del usuario.

- Algunos elementos del inmueble son:
- Trabajo productivo y eficiente
 - Funcionabilidad y eficiencia
 - Ahorro de costos
 - Confort
 - Seguridad
 - Comercialización
 - Flexibilidad

- Diseño
- Sustentabilidad
- Calefacción
- Ventilación

En este sentido un edificio inteligente tiene control total del ambiente que se genera dentro de él, teniendo características favorables para la inspección de cada elemento y tener automatizado el entorno. Según Kirschning, (1992) recalca la integración de la calefacción, la ventilación, la climatización y todas las formas de administración de energía para su implementación. Por lo tanto, esta infraestructura tiene como objetivo, facilitar la estadía en el lugar disminuyendo el uso de energía y el ahorro sustentable del agua, al mismo tiempo debe de trabajar con un gestor de aprendizaje y una red neuronal para la recolección de datos en los diferentes movimientos de los usuarios, para así tener una eficiencia puntal en las necesidades de cada uno de ellos.

Como señala Pombo, Gupta y Stankovic (2018), en “Servicios Sociales Para Ciudadanos Digitales: Oportunidades para América Latina y el Caribe”, se enfatiza la diferencia entre la causa del problema y la posibilidad de predecirlo, aclarando que no hace falta conocer el origen de un problema a predecir, sino que una mayor cantidad de datos relevantes pueden permitir generar modelos con variables correlacionadas para una mayor precisión en las predicciones.

Los edificios inteligentes utilizan tecnologías prometedoras que cooperan con la inteligencia artificial para proporcionar a sus ocupantes comodidad y un entorno energéticamente eficiente, tal como lo describe Luo, (2022) proporcionar una revisión mediante análisis bibliométrico y su aplicación con la tecnológica.

Metodología

En esta sección se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo de energía en tiempo real, que ha sido diseñado por colaboradores del Instituto de Energías Renovables de la Universidad de Guadalajara, para fomentar la cultura del prosumidor. Un prosumidor, se define como aquel usuario del servicio eléctrico que además de consumir energía, también

la genera a partir de energías renovables. De tal forma que debe gestionar un uso responsable para lograr la carbono neutralidad, es decir, que toda la energía que consuma, provenga de energías renovables.

Este desarrollo tecnológico se ha puesto a disposición de la sociedad, para que las empresas, instituciones e industrias de la región, que deseen implementar acciones de transición energética para lograr estas cero emisiones de gases de efecto invernadero, por concepto de utilización de energía eléctrica, puedan socializar este proceso a sus colaboradores, fomentando de esta manera una nueva cultura energética al interior de las organizaciones. Contribuyendo de esta manera a la consecución de los ODS 3, 7, 11, 12, y 13.

Internet de las cosas en la transición energética de la sociedad

El Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés) es un concepto que se refiere a la interconexión de dispositivos físicos a través de internet, permitiendo que estos dispositivos se comuniquen entre sí y con sistemas externos. Estos dispositivos pueden ser cualquier cosa, desde electrodomésticos y vehículos hasta sensores industriales y dispositivos electrónicos. La idea fundamental detrás del IoT es la capacidad de recopilar datos de manera remota, analizarlos y utilizarlos para mejorar la eficiencia, la comodidad y la productividad en una amplia gama de aplicaciones.

Los dispositivos IoT suelen estar equipados con sensores, actuadores y conectividad a internet, lo que les permite recopilar datos del entorno circundante, enviar estos datos a través de internet a servidores o plataformas de análisis y recibir comandos remotos para realizar acciones específicas. Por ejemplo, un termostato inteligente puede recopilar datos de temperatura en una casa, enviar estos datos a una plataforma en la nube que analiza los patrones de uso y ajustar automáticamente la temperatura según las preferencias del usuario.

El IoT tiene aplicaciones en una variedad de industrias, incluyendo hogares inteligentes, ciudades inteligentes, salud, manufactura, agricultura, transporte y más. Ofrece beneficios como la automatización de procesos, la optimización de recursos, la mejora de la toma de decisiones basada

en datos y la creación de nuevas oportunidades de negocio.

Es así, que gracias a esta tecnología, hoy es posible conocer en tiempo real el consumo energético que tienen los edificios, para que el usuario final esté informado y pueda adoptar medidas para gestionar su propio impacto en su huella de carbono.

Inteligencia artificial en la transición energética de la sociedad

La inteligencia artificial (AI por sus siglas en inglés) es un área de la informática que se centra en el desarrollo de sistemas y algoritmos capaces de realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana. Estos sistemas están diseñados para aprender de los datos, adaptarse al cambio, reconocer patrones y tomar decisiones autónomas. Hay varias ramas dentro de la inteligencia artificial, incluyendo el aprendizaje automático (machine learning), el procesamiento del lenguaje natural (natural language processing), la visión por computadora (computer vision), la robótica y más. El aprendizaje automático es una subcategoría particularmente relevante, que se refiere a la capacidad de los sistemas para aprender y mejorar automáticamente a partir de la experiencia sin ser programados explícitamente para tareas específicas.

La inteligencia artificial se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde recomendaciones de productos en línea y reconocimiento facial hasta diagnósticos médicos, conducción autónoma y predicción del tiempo. Su creciente adopción se debe a su capacidad para automatizar procesos, mejorar la eficiencia, optimizar decisiones y ofrecer experiencias personalizadas.

Soluciones se están aportando desde el Instituto de Energías Renovables de la Universidad de Guadalajara

El Centro Universitario de Tonalá fue el primer Centro de la Red Universitaria de Guadalajara y una de las primeras universidades en instalar un sistema fotovoltaico de 499 kWp bajo la ley de Generación Distribuida (Figura 4). Sin embargo, se ha observado que la instalación de generación renovable, como la fotovoltaica, no es suficiente para reducir la huella

de carbono a niveles acelerados como se estipulan en los tratados internacionales: Acuerdo de Paris, COP 26, IPCC, etcétera.



Figura 4. Huerto solar fotovoltaico del CUTonalá.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5 se muestra la evolución de uno de los indicadores energéticos que se monitorean en el Centro Universitario de Tonalá, que es el ahorro de energía de un mes del año actual respecto al mismo mes del año anterior. En la gráfica se puede apreciar que en los años 2019 a 2021 se tuvo un muy buen comportamiento de este indicador, ya que se tenía una disminución en el consumo de energía. Esto claro, debido a la pandemia. Sin embargo, en el 2022, al ir retornando a las actividades normales después de la pandemia, la tendencia fue a la alza. Pero en 2023, esta tendencia fue a la baja, donde los usuarios de los edificios fueron más conscientes respecto a la utilización de la energía, aunque todavía con incrementos de energía respecto al año anterior.

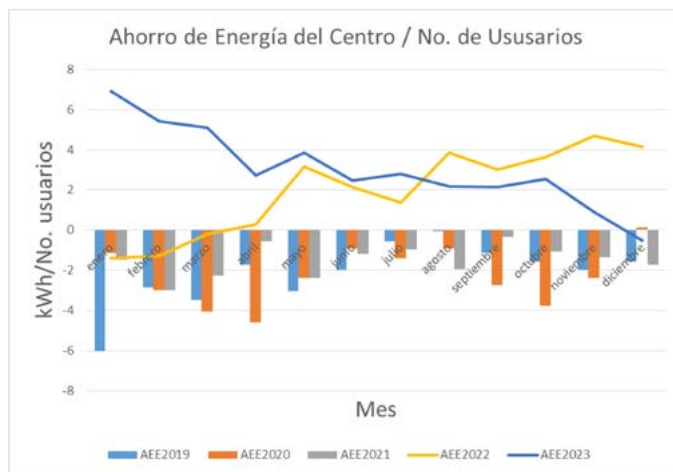


Figura 5. Dinámica del ahorro energético anual por usuario.

Fuente: Tomado del Informe 2023 del Instituto de Energías Renovables de la Universidad de Guadalajara.

Es bien conocida la premisa de que lo que no se mide, no se puede controlar. En este sentido, investigadores, egresados y estudiantes de Ingeniería en Energía, Ciencias Computacionales y tesis de las maestrías y doctorado en agua y energía han desarrollado una plataforma para presentar en formato visual de una pantalla un “dashboard” con la información de la energía generada y consumida en un edificio, de modo que los usuarios de estos puedan estar informados sobre su huella de carbono que se deriva de sus actividades diarias y de qué manera pueden emprender acciones para mitigar ese impacto.

Dentro del mismo “dashboard” se puede ver una actualización consecutiva cada 5 minutos del consumo energético en contraste con lo generado, para así poder corresponderle una “calificación” y hacer un llamado a la acción en caso de tener un “promedio negativo”. También, dentro del espacio de la pantalla, se reproducen videos que son alusivos, además, sobre transición energética, medioambiente, sustentabilidad, y se cuenta con un código QR para invitar a los usuarios a que aporten diferentes acciones e ideas en apoyo del medioambiente y la sustentabilidad.



Figura 6. “Dashboard” para la socialización de la huella de carbono en edificios.
Fuente: Elaboración propia.

Como se comentó en la sección de internet de las cosas, las soluciones tecnológicas de hoy en día permiten conocer en tiempo real el consumo de algún equipo o edificio, gracias a los sensores que se instalan en los centros de carga y que estos mandan la información a algún servidor (IoT). En este sentido, el CUTonalá tiene monitoreado actualmente 8 edificios, tanto en generación fotovoltaica como en consumo, como se muestra en las Figuras 7 y 8.

El grupo de Gestores Energéticos del Centro Universitario de Tonalá, ha estado desarrollando en los últimos años un proyecto basado en el monitoreo de energía en tiempo real, para promover el uso responsable de energía eléctrica en sus edificios, donde a partir de estos sensores en tiempo real, se crea una plataforma para su monitoreo, como se presenta en la Figura 9.



Figura 7. Sensores instalados en el cuarto de inversores del huerto solar fotovoltaico.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 8. Sensor instalado en el centro de carga de las aulas amplias.
Fuente: Elaboración propia.

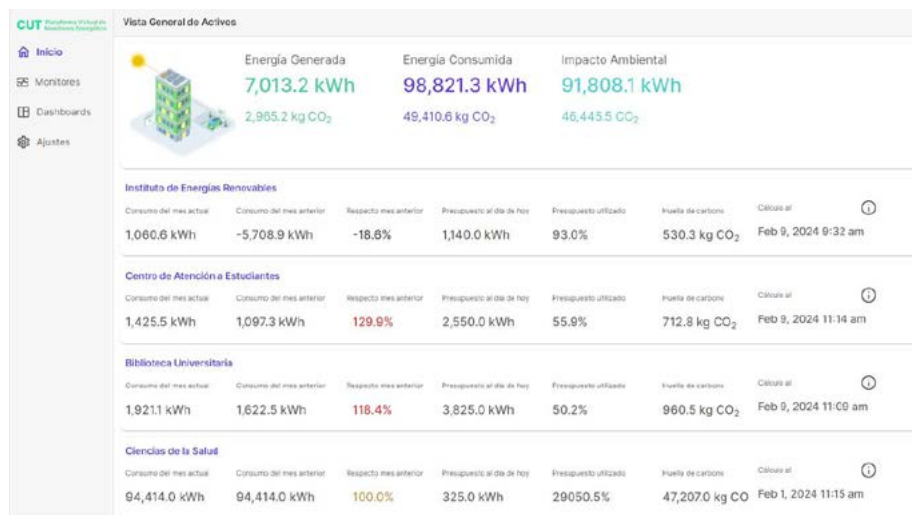


Figura 9. Plataforma de monitoreo de energía en edificios universitarios del CUT.
Fuente: Elaboración propia.

Predicción de generación y demanda con redes neuronales

Hoy en día, es de suma importancia usar de manera eficiente la energía en cualquier tipo de sector, desde las industrias de producción masiva hasta el sector residencial-doméstico, ya que garantiza utilizar de manera correcta los recursos disponibles optimizando el gasto económico que implica la disposición de la energía. Dentro de dicha disposición, se sabe que las actividades que realiza el ser humano tanto para fines económicos como para necesidades básicas guardan un patrón de consumo de energía cíclico y repetitivo en cierta medida. Ante estos patrones cíclicos es posible medir, cuantificar y tener una idea aproximada de cuánta energía se usará en cierta hora del día. Sin embargo, una aproximación intuitiva en términos de eficiencia no es lo ideal, ya que se requiere saber a ciencia cierta cuánta energía se utiliza, la hora en que se utiliza y en que se utiliza.

Por otro lado, en caso de contar con una instalación que genere energía a partir de fuentes renovables como la solar fotovoltaica, eólica o hidroeléctrica, el monitorear y conocer de manera precisa cuánta energía se produce se vuelve aún más importante, ya que el monitoreo constante

de la potencia producida por el sistema, nos brinda información valiosa sobre los patrones de generación y como las variables meteorológicas influyen, debido a que, en general, los sistemas de energía renovable son altamente dependientes a los cambios de estas variables.

Predicción de demanda eléctrica

La predicción de la demanda eléctrica de un sitio determinado, resulta una herramienta importante que nos da la facilidad de poder anticipar acciones concretas o proponer una mejor cultura de consumo eléctrico para hacer más eficiente el manejo de la energía, debido a se tiene una posible demanda (con cierto error de predicción). Esta predicción puede realizarse mediante herramientas como el análisis de series de tiempo, modelos de regresión lineal y polinomial, modelos de promedios móviles simples y autorregresivos (ARIMA) e incluso técnicas de inteligencia artificial. Estas últimas, recientemente han tomado fuerza en este tipo de temas y son más utilizadas por la comunidad científica, gracias a su versatilidad y a que resultan muy intuitivas, ya que su comportamiento simula el aprendizaje humano. Dentro de las técnicas de inteligencia artificial aplicadas a este tópico destacan las redes neuronales artificiales (RNA), las cuales simulan el comportamiento de la transmisión de información y aprendizaje en el cerebro humano. En este tipo de modelos, no es necesario conocer el proceso interno ni el modelo general del sistema, ya que la red neuronal aprende, reconoce e interpreta patrones entre las variables de entrada para obtener un resultado determinado. En este sentido, resulta de utilidad intentar utilizar un predictor basado en redes neuronales artificiales para la estimación de la demanda eléctrica en un determinado lugar, a partir del comportamiento histórico de esta, así como para la estimación de la potencia generada por un sistema de energía renovable como un parque solar o eólico.

En particular, el Centro Universitario de Tonalá cuenta con una red de monitoreo del consumo de energía eléctrica a lo largo del día, la cual obtiene datos de demanda de 4 edificios (biblioteca (BIB), centro de atención a estudiantes (CAE), edificio de salud (SAL) y el instituto de energías renovables (IER)). Los datos que se obtienen de la potencia

demandada son datos que se registran en promedio cada hora, dependiendo de la disponibilidad de la red de internet, ya que el envío de datos está directamente relacionado con la conexión de Wi-Fi. Debido a esto, existen datos que no son transmitidos al servidor por cuestión de la red. En la práctica, el uso de estos datos como entrada en una red neuronal es un problema, ya que una red neuronal necesita datos completos para poder predecir de manera correcta el comportamiento a lo largo del día de la demanda. Esta omisión de datos obliga a un pretratamiento, en el cual es necesario completar los datos vacíos. El proceso de llenado de datos se realiza utilizando interpolación lineal. Sin embargo, el proceso de interpolación de los datos en este momento se encuentra en una fase donde se realiza artesanalmente, es decir, dato por dato, lo cual resulta ser poco práctico al tratar datos con un volumen grande. Es necesario asegurar que la red será estable en todo momento para garantizar que el sensor estará mandando datos de manera constante con un horizonte de tiempo fijo.

A grandes rasgos, el funcionamiento de una RNA se puede resumir en tres pasos: aprendizaje, validación y prueba. En la primera fase, la RNA analiza un porcentaje de los datos obtenidos (por lo general 70 %) para encontrar patrones y relaciones entre las variables en cuestión, las cuales en nuestro caso son potencia de consumo y tiempo. En la fase validación toma un 15 % de datos para verificar que efectivamente la fase de aprendizaje se llevó a cabo correctamente y finalmente, en la fase de prueba se toma el 15 % restante de datos para retar a la RNA con datos diferentes y ver su comportamiento.

Las métricas más utilizadas para evaluar el rendimiento de una RNA son el coeficiente de correlación R y el error cuadrático medio (ECM). Ambas métricas nos sirven para identificar qué tan buena es una predicción, ya que el primero de ellos señala un número entre 0 y 1 (idealmente mayor a 0.95), que evalúa la semejanza o relación lineal entre la predicción y los datos, mientras que el segundo es un valor de tolerancia definido según la aplicación o el problema en cuestión, donde se dictamina que si el ECM es menor a ese valor, se considera una buena predicción, aunque R no sea tan cercana a 1.

Estudio de caso

En este ejemplo de predicción se toman 7 días de datos horarios dentro del periodo comprendido entre el 16 y el 20 de enero de 2023 para el edificio (SAL), utilizando una red neuronal no lineal autorregresiva (RNA-NLAR), en la cual se predice el valor de la demanda en cierta hora del día a partir del comportamiento anterior de la misma. En la figura 10 se muestra la demanda típica de una semana escolar.

De los resultados obtenidos (Figura 10) se observa que el coeficiente de correlación global entre los datos y la predicción es de 0.96607, por lo cual se dictamina que se encuentra una buena correlación entre ambos datos. Por su parte, el ECM obtenido es de 1.066 kW. Al observar la gráfica, gran parte del error es debido a la demanda base; sin embargo, la demanda base no es la zona de interés, sino los picos de alta demanda, en los cuales la predicción obtenida es muy similar a los datos reales. Posterior a los resultados obtenidos, resulta necesario evaluar la RNA ante un monitoreo en tiempo real, lo cual ayudará a mejorar el aprendizaje de la red y evaluar el rendimiento de la misma en modo dinámico.

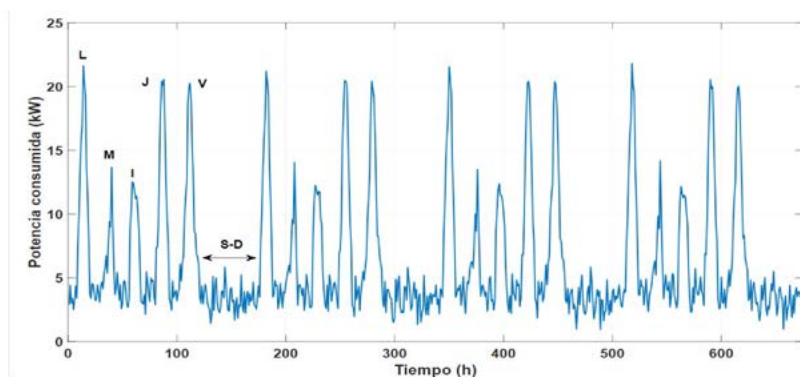


Figura 10. Demanda eléctrica de una semana en el edificio SAL.

Fuente: Elaboración propia.

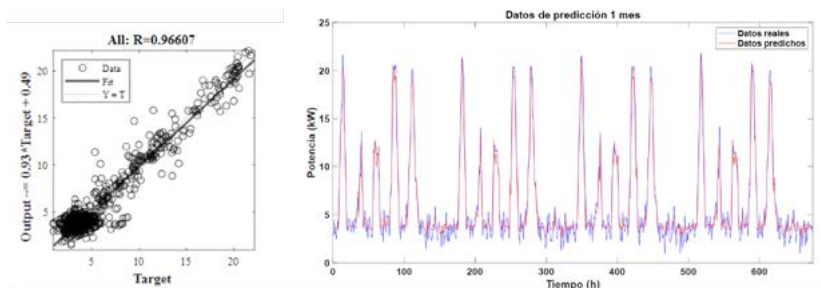


Figura 11. Resultados de predicción mediante RNA-NLAR.

Fuente: Elaboración propia.

Predicción de generación de energía solar fotovoltaica

Por otro lado, el Centro Universitario de Tonalá cuenta con un parque solar conformado por 1560 módulos fotovoltaicos de 320 W, los cuales generan electricidad destinada a satisfacer la demanda eléctrica de los edificios antes mencionados. Dicha generación de energía está directamente ligada a factores atmosféricos y geográficos como la irradiancia solar, la temperatura y la ubicación. Se sabe que la potencia generada por N módulos fotovoltaicos está definida por la ecuación:

$$P_{PV} = N_{PV} P_{NOM} D_{rf} \frac{G}{G_{STD}} [1 + \alpha(T + 0.0256G - T_{STD})] \quad (1)$$

Donde PPV es la potencia total generada por los módulos, NPV es el número de módulos, PNOM es la potencia nominal indicada por el fabricante, Drf un factor de pérdida (por lo general entre 0.85 y 0.90), G es la irradiancia solar del lugar, GSTD es la irradiancia a condiciones estándar (1000 W/m²), alpha es el coeficiente de temperatura, T la temperatura del lugar y TSTD la temperatura estándar (25 °C). En la figura 12 se muestra la generación de energía en el año 2022, con un promedio alrededor de los 400 kW y un pico de generación de 450 kW en el mes de marzo.

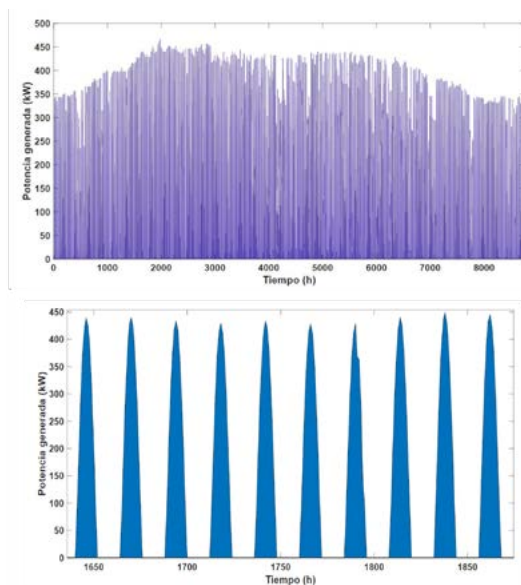


Figura 12. *Generación fotovoltaica del parque solar.*

Fuente: Elaboración propia con datos de la National Solar Radiation Database, NREL (2022).

Al observar la gráfica de generación, es posible notar que la potencia fotovoltaica obedece un comportamiento cíclico donde la misma presenta un pico marcado durante el día, mientras que esta cae a cero durante la noche. Debido a lo anterior, es posible implementar una RNA para predecir la generación fotovoltaica durante el año. En la figura 13 se muestran los resultados obtenidos, donde se observa que el coeficiente de correlación es de 0.94424.

Discusión

Existe la necesidad de abordar la reducción de emisiones de GEI de una manera acelerada, por lo que en las rutas de descarbonización de los diferentes sectores, no solo se debe buscar la transición a las energías renovables y la eficiencia energética, sino también cambiar el aspecto cultural de los usuarios de los edificios, para que puedan alcanzarse esos objetivos de carbono neutralidad para el 2050. Es ahí donde la inteligen-

cia artificial puede fungir como un asistente para la gestión energética de los edificios, basándose en la predicción de consumo y generación. Existe poca literatura que se enfoque en esta temática de la IA aplicada a modificar los hábitos de consumo, por lo que este capítulo puede ayudar a explorar esta posibilidad.

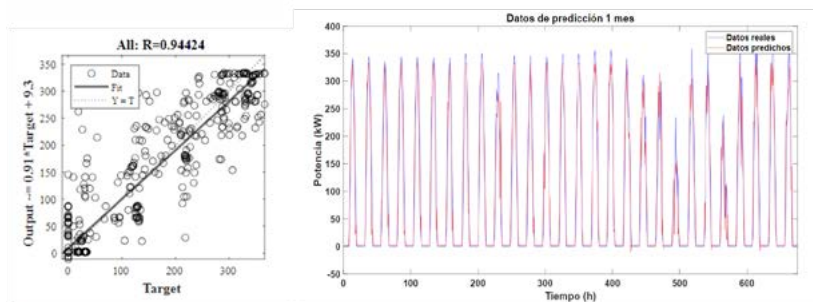


Figura 13. Resultados de predicción mediante RNA-NLAR.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Actualmente, este sistema de monitoreo de energía ya se encuentra funcionando como prueba piloto en ocho edificios del Centro Universitario de Tonalá, donde se busca lograr la carbono neutralidad de los edificios intervenidos, logrando así contribuir al ODS 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles, y al ODS 7, energía asequible y no contaminante.

El siguiente paso de este proyecto es acercar este tipo de tecnología a diferentes edificios del Área Metropolitana de Guadalajara, con el objetivo de promover una nueva cultura energética, donde la inteligencia artificial funcione como un gestor automático de energía, que ajuste de manera adaptable las metas energéticas para cada edificio en función de su consumo de energía eléctrica, su producción fotovoltaica y sus potenciales de ahorro en dos vertientes: control automático de demanda y uso responsable de energía demandada por los usuarios.

Referencias

- Agüero, G.A., Vivas, H.L., & Britos, P.V. (2022). *Inteligencia Artificial y ciudades inteligentes. Una mirada sobre la perspectiva Ética para el desarrollo de servicios digitales ciudadanos*, monografía.
- Arencibia-Pardo, F.R., Peña-Rodríguez, B., & Caicedo-Villamizar, S.B. (2020). *El entorno de sustentabilidad en los edificios inteligentes, pasos para una “Domótica saludable preventiva”*.
- Batlle, M.J., Martine, D., Sally, K., & Els Van, C. (2019). *La inteligencia artificial en las ciudades*.
- Caird, S. (2018). *Enfoques urbanos para la evaluación y presentación de informes sobre ciudades inteligentes: estudios de caso en el Reino Unido*.
- Caird, S., Hudson, L., & Kortuem, G. (2016). *Una historia de evaluación e informes en las ciudades inteligentes del Reino Unido*.
- Cabello, S. (2022). *El camino de desarrollo de las ciudades inteligentes, una evaluación de Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México y São Paulo*.
- Corporate.enelx.com. (S.F.). *¿Qué es una ciudad inteligente?* Recuperado de <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-a-smart-city>
- Dongsu, K., Yeobeom, Y., Jongman, L., Mago, P.J., Kwangho, L., & Heejin, C. (2022). *Diseño e implementación de edificios inteligentes: una revisión de la tendencia de investigación actual*.
- González, S.F. (2017). *Smart cities, la evolución de las ciudades*.
- Luo, J. (2022). *Una revisión bibliométrica sobre inteligencia artificial para edificios inteligentes*.
- ONU. (2020). *Emisiones del sector de los edificios alcanzaron nivel récord*. Recuperado de <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/emisiones-del-sector-de-los-edificios-alcanzaron-nivel#:~:text=La%20operaci%C3%B3n%20y%20construcci%C3%B3n%20de,la%20neutralidad%20clim%C3%A1tica%20en%202050>
- PACmetro. (2020). *Plan de Acción Climática del Área Metropolitana de Guadalajara*. Recuperado de <https://www.imeplan.mx/pacmetro/>

- PRODESEN. (2023). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037*. Recuperado de <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>
- CONUEE. (2014). *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conuee/prensa/notas-seleccionadas-del-dia-16-de-diciembre-de-2014>
- Ley de Transición Energética. (2015). Recuperado de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>
- Prospectiva de Energías Renovables. (2018). Recuperado de <https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico>
- COPARMEX. (2023). Recuperado de <https://coparmex.org.mx/subastas-de-largo-plazo-de-energia-electrica-en-mexico/>

Capítulo 5

Transición energética en la industria automotriz

*Francisco Ernesto Navarrete Báez
Universidad del Valle de Atemajac
francisco.navarrete@univa.mx*

<https://doi.org/10.61728/AE20251994>



Resumen

El presente capítulo trata de explicar el proceso de la transición energética de vehículos automotores que utilizan combustibles de origen fósil a fuentes eléctricas provenientes de energías renovables. Primeramente, se da un panorama actual de la industria automotriz convencional, tanto a nivel mundial como en México, lugar en donde se ubica esta investigación. Detallando el volumen de producción en Norteamérica a partir del tratado de libre comercio T-MEC en esta región. Revisando la importancia económica que este sector genera en estos tres países, pero también el impacto ambiental que provoca el uso del automóvil en forma pública y privada. Se hace un comparativo con China para comprender el impacto del dominio de producción que actualmente tiene ese país. Se detallan los principales contaminantes que genera esta industria para dimensionar su impacto ambiental y social. Y, por consiguiente, ver las alternativas que se tienen para sustentar esta transición. Finalmente, se hace un análisis del interés, tanto económico como político, de migrar a automóviles eléctricos, resaltando los múltiples obstáculos que se tienen para concretar la factibilidad y la viabilidad de esta transición. Enfocándose principalmente en las baterías eléctricas como su principal obstáculo.

Introducción

Dentro de la transición energética mundial, un componente que no se debe dejar de lado es el de los vehículos automotores. Un mercado mundial que tiene más de 120 años, con incremento de volúmenes de producción y de venta año con año. Y que el uso de combustible, tanto gasolina como diésel, ambos de origen fósil, ha marcado la pauta todo este tiempo.

La evolución del uso del automóvil ha variado mucho; de acuerdo a la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA, 2024), esta ha cambiado severamente en los últimos 50 años. De ser el automóvil un

transporte de lujo, con acceso para muy pocas personas, a convertirse en el medio de transporte familiar, debido principalmente al abaratamiento de su costo y la accesibilidad a crédito, propiciado, en primera instancia, por la empresa Ford Motor Company en los años 20 del siglo pasado (Ford, 2024), y después extendido a todas las marcas de carros y su penetración en los distintos países en donde se distribuyen.

Otro fenómeno que impactó en esta industria es que a mediados de los años 80, el hábito del uso del automóvil se extendió a más miembros de cada familia. De pasar a tener un vehículo por familia. Ahora se observa de 2 a 3 automóviles, en promedio, por familia. Lo que hace que el volumen de vehículos circulando se haya triplicado en los últimos 30 años.

Este fenómeno de uso personal del automóvil es debido principalmente a dos factores: la reducción de costos en los procesos de producción y distribución de los fabricantes y la facilidad de crédito (reducciones de tasas de interés) y extensión de plazo de dichos pagos por parte de los acreedores, permitiendo así una venta mayor año con año (NEURON, 2022). Aunado al crecimiento de las grandes ciudades, que implican grandes recorridos de traslado hogar-trabajo-hogar, reduciendo el tiempo del mismo, con mayor confort y seguridad.

Este crecimiento de producción y venta de vehículos tiene tanto beneficios como perjuicios. Por un lado, la industria automotriz desde hace casi 100 años ha sido uno de los principales motores de las economías en muchos países. México no es la excepción. Es generadora de un poco más del 4 % del PIB mexicano (STATISTA, 2023), genera más de un millón de empleos directos e indirectos, y ha sido pilar del desarrollo económico mexicano a partir del Tratado de Libre Comercio (TLCAN y después T-MEC) desde 1994. La economía mexicana de hoy difícilmente se entendería sin la presencia del sector automotriz.

Actualmente, como se mencionó, la industria automotriz genera el 4 % del PIB mexicano y el 18 % del PIB manufacturero (FORBES, 2023). Lo que arroja un gran impacto económico en la región. Además, con la política de integración regional entre Estados Unidos, México y Canadá (Navarrete-Báez, 2016), en donde se desea atraer toda la manufactura a la región, el denominado término de *nearshoring*, se está haciendo cada día más atractivo que más plantas manufactureras de automóviles

y de autopartes trasladen su producción —principalmente de China— a México. Considerando esta experiencia de más de 30 años de integración, la cercanía con el mercado americano y la buena experiencia en resultados que ha presentado México en la fabricación y distribución de estos productos al mercado más grande de consumo del mundo.

De este contexto de bonanza económica para el mundo y en particular para México debido al fuerte crecimiento de esta industria, se generan también una serie de perjuicios: el gran parque vehicular que circula día con día, afectando directa e indirectamente la movilidad de las personas de una ciudad que necesitan trasladarse principalmente a su área de trabajo. Consumiéndoles horas y horas al día, impactando en su calidad de vida. Y otro factor, al que dedicaremos estos trabajos, el gran generador de contaminantes propiciados por el consumo masivo de combustibles fósiles. Ya sea gasolina o diésel, que impacta directamente en la salud de los habitantes de cada ciudad.

La industria automotriz y sus fuentes contaminantes

Basado en este contexto general del panorama de la industria automotriz mundial, nos enfocaremos a delinear y mostrar los efectos contaminantes que este sector genera a nivel mundial y su impacto. Además, de las políticas internas que han desarrollado las marcas productoras para mitigar este efecto negativo, principalmente en los seres humanos.

La tabla 1, de acuerdo a la Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA, 2022) nos muestra las principales fuentes generadoras de dióxido de carbono (CO₂).

Tabla 1. Fuentes generadoras de CO₂

Fuente: OICA (2022)

Manufactura y construcción	18.2 %
Transportación (carros, camiones y bus)	15.9 %
Otros transportes (avión, barcos)	5.8 %
Otros	4.0 %
Generación de electricidad y calefacción	43.9 %
Combustión para otros usos	12.2 %
Total	100 %

Se observa que casi el 16 % del CO₂ es producido por la industria automotriz, a través de lo que generan los carros (denominado transporte ligero de menos de una tonelada de peso), camiones (de una a dos toneladas) y los buses (más de dos toneladas). Y en general la movilidad está generando un 21.7 % del total de estas emisiones.

Del total de estas emisiones por movilidad, la tabla 2 nos señala por rubro su impacto. Se observa claramente que la transportación terrestre se lleva tres cuartas partes de todas las emisiones; y es entendible, ya que, aunque hay cientos de miles de vuelos de avión al día alrededor del mundo, nunca se van a comparar con la movilidad de carros, camiones y buses en todas la ciudades y áreas rurales del mundo.

Tabla 2. CO₂ generado por cada medio de transporte

Fuente: Mansur-Solar (2023).

No.	Medio de transporte	Porcentaje de CO ₂
1	Terrestre	75 %
2	Aéreo	13 %
3	Marítimo	11 %
4	ferroviario	1 %
5	Otros	<1 %
	Total	100 %

Se observa entonces que el impacto que genera la industria automotriz también se ve reflejado en la denominada huella de carbono, es decir, el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO₂ equivalentes (Iberdrola, 2022), que en su caso esta industria produce alrededor de 7700 millones de los 36 800 millones de toneladas anuales. Además, habrá que incluir las emisiones generadas por todas las fábricas que producen automóviles y sus autopartes, y cuyo impacto es casi el triple.

Por otra parte, los vehículos además de generar CO₂ producen otros tipos de emisiones también dañinas. La tabla 3 desglosa las cinco principales emisiones.

Tabla 3. Emisiones de vehículos.

Fuente: OICA (2022)

No.	Emisión	Resultado
1	Dióxido de carbono CO ₂	Generado por la quema de combustible que contiene carbono
2	Monóxido de carbono CO	Se produce cuando un combustible se quema de forma incompleta. Altamente perjudicial a los seres vivos
3	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	Son los combustibles no quemados que quedan de remanente
4	Óxidos de Nitrógeno NOx	Generado cuando el aire se calienta por el motor
5	Partículas en Suspensión PS	Partículas muy pequeñas, principalmente carbono no quemado

Se observa que, de continuar con esta dinámica del uso vehicular de combustión interna sin medida, seguirá creando problemas más graves de los que tenemos actualmente, muchos irreversibles, por lo que este sector industrial se está repensando, a partir de este siglo, qué hacer en dicho mercado.

Industria automotriz en Norteamérica

La industria automotriz en la zona de Norteamérica ha tenido un crecimiento exponencial a partir de la firma del Tratado de Libre Comercio entre México, Estados Unidos y Canadá, firmado en 1992, puesto en marcha en 1994 (TLCAN) y reafirmado en 2018 (T-MEC). Esto significa que en los últimos 30 años se ha conformado un conglomerado de empresas que dan vida a la industria automotriz en la región.

Comenzando con la relocización de plantas manufactureras entre los tres países, la apertura de plantas manufactureras de autopartes (denominadas Tier-1 y Tier-2), con el propósito de fortalecer y hacer más eficiente la cadena de suministros, hasta la estandarización de procesos productivos que incluyen calidad, reducción de costos y servicio al cliente (Murillo-Villanueva y Carbajal Suárez, 2023).

Actualmente en México se producen 57 modelos carros diferentes. La tabla 4 nos muestra los mismos por fabricante.

Tabla 4. Vehículos automotores hechos en México al 2024

(*) única marca de procedencia china. Fuente: Desarrollo propio basado en Mural (2024)

No.	Marca	Cantidad	No.	Marca	Cantidad
1	Audi	1	10	INFINITI	2
2	BMW	3	11	JAC*	13
3	Chevrolet	6	12	JEEP	1
4	Ford	3	13	KIA	4
5	GMC	3	14	Mazda	5
6	Honda	2	15	Mercedes-Benz	1
7	Hyundai	1	16	Toyota	1
8	NISSAN	5	17	VW	3
9	RAM	3		Total	57

Se observa que son 17 distintos fabricantes de automóviles, fabricando en 20 distintas plantas instaladas a lo largo de México, más alrededor de 500 empresas manufacturando autopartes para las mismas. Generando más de dos millones de empleos directos e indirectos, además, estos empleos se consideran los mejor pagados del país.

Lo que consolida fuertemente este sector para este país, producto de los 30 años de haber iniciado operaciones el TLCAN. Creando a su vez una cultura de trabajo bastante homogénea que no solo se dedica a manufacturar partes y automóviles (el caso concreto de México), sino que a su vez ya existe aportación en el rubro de Investigación y Desarrollo (R&D) con centros de investigación ubicados en suelo mexicano y con aportaciones de empleados mexicanos.

Industria automotriz china en Norteamérica

Pero a su vez, el mercado norteamericano se ha visto invadido y amenazado por la creciente producción y venta de automóviles hechos en China. Principalmente de marcas norteamericanas y europeas, pero también de sus propias marcas.

Se observa una gran integración de manufactura, distribución y venta de automóviles en Norteamérica, impactando fuertemente en la economía de estos tres países. La consolidación de este hecho confirma los grandes volúmenes de carros que se producen y se venden en los últimos años.

Pero, por otro lado, está creciendo la producción de vehículos hechos en China. Aunque muchos de estos son de marcas norteamericanas, son integrados y manufacturados en aquel país, con precios más baratos y casi con la misma calidad de los hechos en esta región del mundo. Lo que ha impactado en las ventas de carros desde fuera de la región. Además, que ha impedido generar nuevos empleos y mantener los que ya se tienen debido a que muchas de las plantas manufactureras o, en su caso, modelos de automóviles, se están trasladando a China.

El impacto no es menor, ya que llegan con precios al mercado más bajos y las marcas locales ya no pueden competir. Se piensa que estos vehículos llegan subsidiados por el gobierno chino, en lo que se le conoce como *dumping*, o competencia desleal, por lo que es difícil competirles (Los Angeles Times, 2024).

La Figura 1 muestra el comparativo de producción automotriz por países del T-MEC de los últimos cinco años, destacando el volumen en cifras hecho en México. En color rojo se agrupan todos los vehículos hechos en Norteamérica y se comparan con los manufacturados solo en China, en color amarillo, que en los dos últimos años produce el doble de autos que esta región.

En negro se destaca la producción de automóviles a nivel mundial, en la cual la región del T-MEC junto con China producen casi el 50 % de todo el volumen.

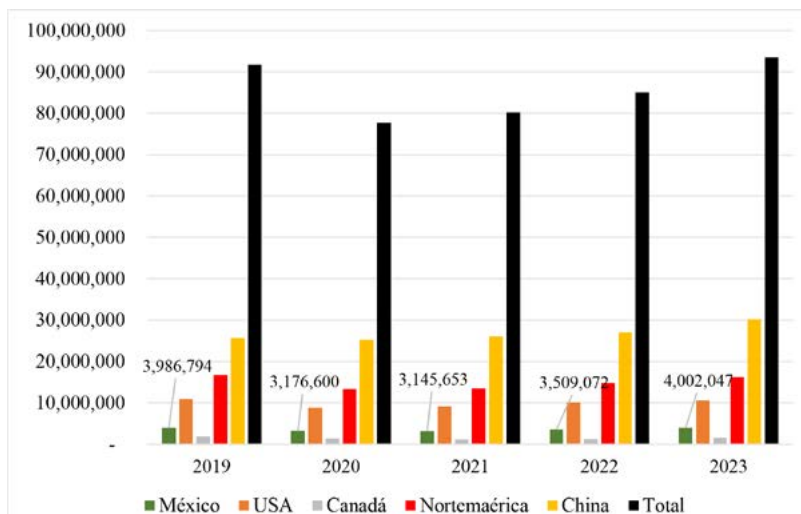


Figura 1. Comparativo de producción anual de autos 2019-2023.

Fuente: (OICA y AMIA, 2024)

Es clara la amenaza de China en cuanto al intento de acaparar el mercado de automóviles, considerando además que en la región de Norteamérica el consumo de carros es el mayor del mundo, después del consumo interno chino, y por encima de la Unión Europea. Y que con el paso de los años seguirá aumentando.

En estos momentos actuales de transición de gobierno en Estados Unidos, está sobre la mesa grabar con aranceles de más del 30 % la importación de vehículos chinos para disminuir este efecto económico.

Y cómo se ha desarrollado la venta de vehículos en México: más allá de ser un gran productor y exportador de estos, el mercado mexicano, o sea, el consumo interno, tuvo un declive notorio debido a la pandemia de covid-19. Expresado en la figura 4.

La Figura 2 muestra el desarrollo de este consumo de automóviles a nivel mundial en los últimos cinco años. Mostrando una franca recuperación los dos últimos años (68 % vehículos de pasajeros, 32 % vehículos comerciales). Lo que ha generado, por un lado, un fortalecimiento de esta industria en consumo doméstico, pero, por otro lado, ha aumentado considerablemente el consumo de energías fósiles (principalmente

gasolina) y ha impactado también en la emisión de gases contaminantes que explicamos anteriormente.

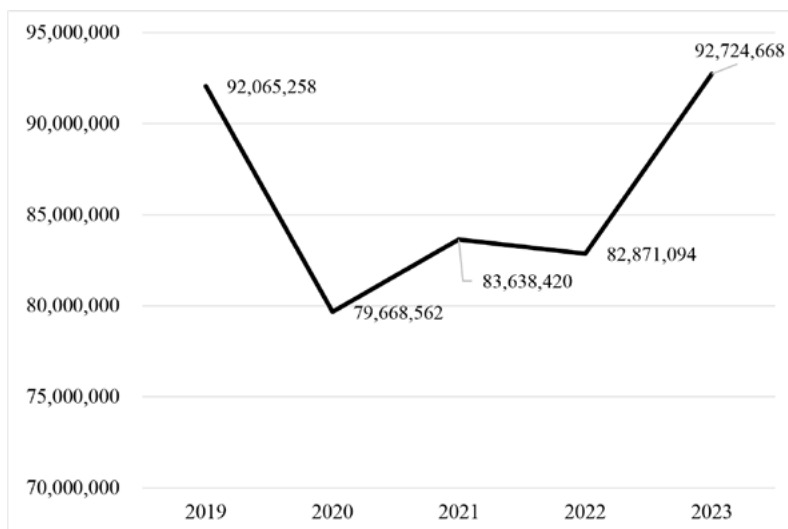


Figura 2. Ventas globales de vehículos 2019-2023.

Fuente: OICA, 2024.

En general, se puede observar que la producción y el consumo de vehículos a gasolina sigue creciendo, dejando rezagado el consumo de automóviles que utilicen fuentes alternas y limpias de energía.

Transición energética automotriz

Ya considerando este panorama global de este sector, analizamos la transición energética de la industria automotriz, es decir, el camino del consumo de automóviles hacia la electrificación de la flota vehicular en las próximas décadas (AMIA; 2024).

La tabla 5 nos muestra con detalle las tecnologías actuales que utilizan los vehículos eléctricos (AMIA, 2024), mostrando sus características, así como sus ventajas, desventajas y limitaciones de las mismas.

Tabla 5. Tecnología de vehículos eléctricos.

Fuente: Desarrollo propio basado en AMIA (2024).

Tipo	Híbridos (HEV)	Híbridos Enchufables (PHEV)	Eléctricos de Batería (BEV)	Eléctricos de Celdas de Combustible (FCEV)
Propulsión	Motor eléctrico Motor de combustión interna	Motor eléctrico Motor de combustión interna	Motor eléctrico	Motor eléctrico
Sistema de energía	Batería Ultra condensador Unidad generadora ICE Estación gasolina	Batería Ultra condensador Unidad generadora ICE Estación gasolina Instalación de carga de la red eléctrica	Batería Ultra condensador Instalación de carga de la red eléctrica	Batería Propulsados por hidrógeno
Fuentes de Energía	Estación de gasolina	Estación de gasolina Instalación de carga de la red eléctrica	Instalación de carga de la red eléctrica	Estación de hidrógeno
Observaciones	Continúa dependencia de combustibles fósiles Mantenimiento de batería	Continúa dependencia de combustibles fósiles Disminución de emisiones contaminantes Mantenimiento de batería	Disminución de emisiones contaminantes Mantenimiento de batería	Disminución de emisiones contaminantes Oferta actual muy limitada Mantenimiento de batería No se ha garantizado su sostenibilidad

Actualmente en el mundo las tecnologías que más venden vehículos son la híbrida con el 86 % del total, después están los híbridos conectables con el 8 %, después los eléctricos con el 6 % (AMIA, 2023 y OICA, 2023).

Las principales marcas de automóviles seguirán apostando a la tecnología híbrida por los siguientes años al no tener garantizado el suministro y la infraestructura propia de energía eléctrica a nivel mundial y local.

El mercado de automóviles eléctricos ha ido evolucionando los últimos años. Para el periodo del 2017 al 2021, las ventas mundiales fueron de 15 301 072 unidades, repartidas en híbridos conectables (29.4 %) y eléctricos (70.6 %). A finales de 2023, se estimaba que había 41 993 140 automóviles eléctricos e híbridos enchufables en circulación en todo el mundo (OICA, 2024).

La Figura 3 muestra un comparativo anual del 2019 al 2023 de las ventas mundiales totales de carros comparados con los eléctricos (de todo tipo). Para el 2019, el 2.5 % correspondió a automóviles eléctricos; el 2020 fue de 4.1 % del total (considerando tiempos de pandemia); ya para el 2021 había sido del 8.1 %, el doble con respecto al año anterior. El 2022 concluyó con un 12.9 %, y finalmente el 2023 tuvo un 15.1 %. Lo que se puede interpretar que, aunque muy lenta, la transición energética automotriz se está produciendo.

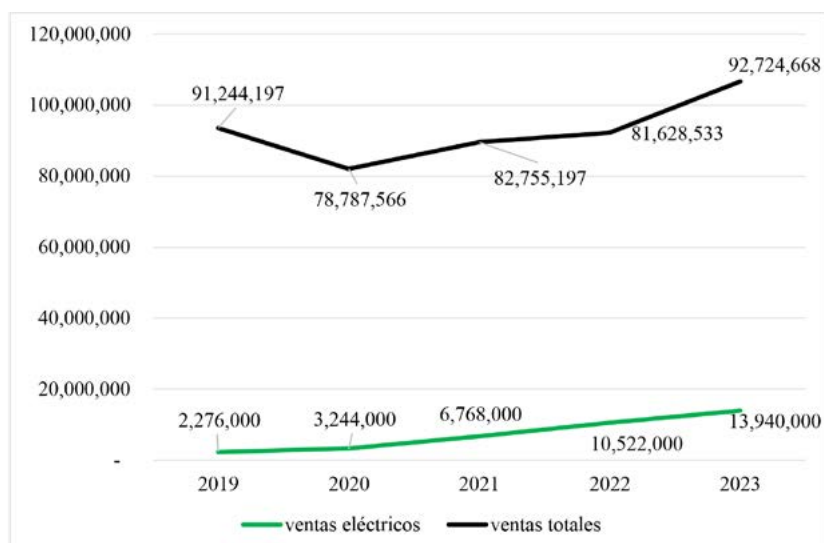


Figura 3. Ventas totales vs. Ventas eléctricas 2019-2022.

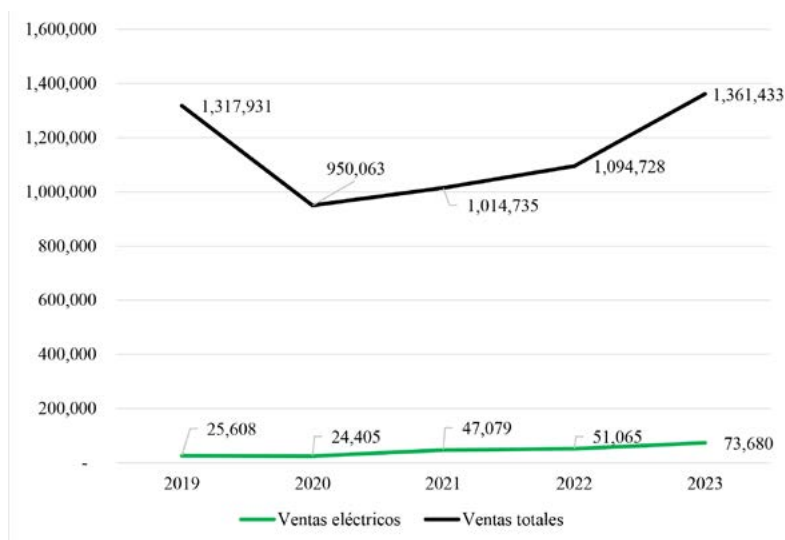
Fuente: (OICA y AMIA, 2023).

En México, la venta de automóviles eléctricos no ha sido tan buena como lo planeado, principalmente por cuestiones económicas, el carro eléctrico se eleva entre un 30 y un 40 % más que su similar a gasolina, y como casi el 60 % de la compra de carros en el país es a crédito (Autocosmos, 2024), las personas optan por la alternativa más barata. Además, también el factor del costo de la electricidad (energía) es alto, y el factor de la poca infraestructura en todo el territorio nacional para recargar las baterías, crea cierta desconfianza de su uso, principalmente en traslados largos, entre ciudades.

Localmente qué está pasando en México. Para el año 2022, se vendieron 51,065 unidades de vehículos eléctricos, híbridos e híbridos conectables, lo que representa el 4.7 % de las ventas totales de vehículos nuevos.

De acuerdo a la AMIA (2024), a principios del 2024 habían operando 1146 estaciones de carga. Una cantidad muy baja considerando el tamaño del país, el parque vehicular eléctrico circulando y el tiempo de recarga promedio de alrededor de 5 horas, lo que le hace tener poca viabilidad de operación y uso.

La figura 4, hace una analogía de la figura 3, pero localizada en México. En general, los volúmenes de ventas son todavía muy bajos. Se observa que en el año 2019 fue de 1.8 % de autos eléctricos del total vendidos, en el 2020 fue 2.5 % (afectado principalmente por los efectos de la pandemia), el 2021 arrojó un 4.6 %, un aumento significativo. El 2022 quedó prácticamente igual que el año anterior, y ya para el 2023 reflejó un 5.3 %, y se espera que el 2024 cierre con mayor incremento.

Figura 4. México: ventas totales vs. ventas eléctricas 2019-2023

Fuente: (OICA y AMIA, 2023).

Otro elemento para que la industria automotriz eléctrica detone es la producción de las baterías eléctricas que llevan todos estos tipos de carros. El elemento más importante, diferenciador y significativo, que además es costoso de producir y que su cadena de suministros es muy limitada.

Los costos de inversión para la generación y producción de baterías son muy elevados. Se estima que se invertirá alrededor de mil 200 millones de dólares (Expansión, 2022) para el año 2030 para cubrir la demanda esperada de 3.4 TWh necesarios para abastecer el mercado.

Aunque hay algunas otras alternativas de componentes principales de estas baterías, el elemento principal es el litio. El 95 % de las baterías eléctricas automotrices y de otros productos es de litio (también las hay de sodio, níquel, cobalto, azufre, entre otros).

Un automóvil, en promedio, necesita entre 7 y 8 kg. De litio, lo cual hace muy onerosa su producción en serie.

Por lo que encarece mucho el precio final de venta y, por lo tanto, todavía no pueden competir en precios con los carros de gasolina o diésel (S&P Global Mobility, 2024).

Los yacimientos de litio son escasos en el mundo, además de que su extracción es muy costosa e invasiva.

Para entender la situación actual de la producción de litio y la producción de baterías de litio, la figura 5 nos muestra los principales productores de litio por tonelaje a nivel mundial en los dos últimos años. Se concentra principalmente en cuatro países: Australia, con el 53 % de la producción total; Chile, con el 27 %; China, con un 13 %; y Argentina, con el 6 % (IEA, 2023 y DW, 2023).

Se sabe que existen otros yacimientos de litio a considerar, como los que se ubican en Bolivia, Estados Unidos e inclusive México, entre otros, pero hoy en día están en etapa de exploración y muy baja extracción, por lo cual no se integran a la cadena de valor del mismo. Además, hay que agregar lo invasivo que es la extracción de litio de sus minas y el impacto ambiental que de esto se deriva en cada región.

La figura 6 nos muestra la producción de baterías de litio. Observándose el gran dominio de China a nivel mundial con un 79 % de la producción de la misma. Muy lejano le sigue Estados Unidos con un 6 %; y finalmente se ubican Hungría y Polonia.

Como es claro, la dependencia de China para la integración de automóviles eléctricos es muy grande. Teniendo el control casi total de la demanda de carros eléctricos, decidiendo a quién abastecer y cuándo. Dando prioridad a su mercado interno, nacional y extranjero, y desde el último año, favoreciendo a marcas chinas.

Aunque hay planes de abrir plantas manufactureras en otros países, ya sea de la Unión Europea o en los mismos Estados Unidos y México, como es el caso de BMW México, que en su planta en la ciudad de San Luis Potosí proyecta abrir una fábrica de baterías de sexta generación para el año 2026 (BMW México, 2024), el volumen para los siguientes cinco años será muy bajo para hacer frente y competir con las plantas instaladas en China.

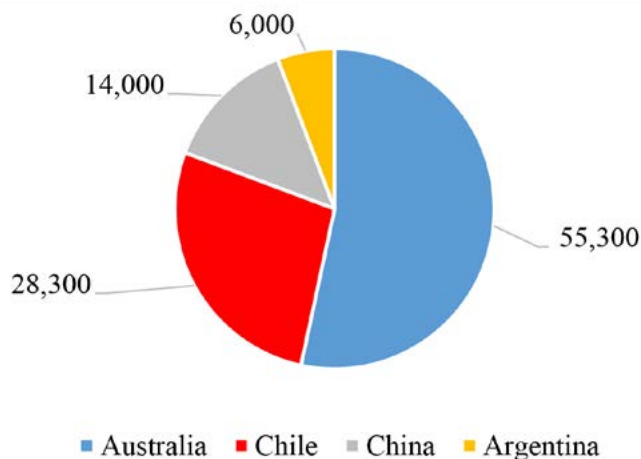


Figura 5. Producción de litio (2022-2023).
Fuente: (IEA y DW, 2023).

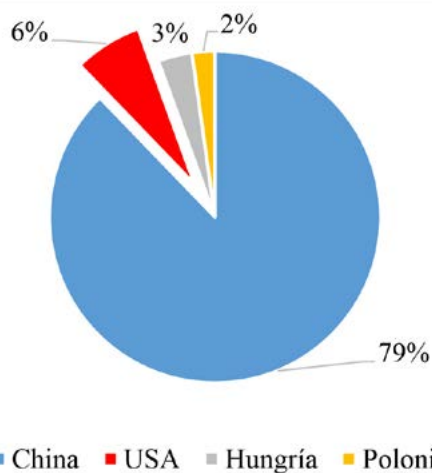


Figura 6. Producción de baterías de litio (2022-2023).
Fuente: (IEA y DW, 2023).

También están surgiendo varias alternativas de baterías eléctricas usando otros componentes, como son los de iones de sodio, de litio-azufre, de estado sólido, pilas de combustible de hidrógeno, baterías acuosas de magnesio, o bien las baterías de grafeno, pero todas estas siguen en fase

de pruebas y no representan ventajas significativas sobre las convencionales de litio. Para que se hagan realidad en un proceso de producción en masa, tardará muchos años más (Futuro Sustentable, 2023).

Retos de la transición energética automotriz

Entre los múltiples retos que este fenómeno tiene, podemos enlistar, basado en lo que los expertos mencionan, los más importantes:

- a) Descarbonizar la economía a nivel mundial para el año 2035, principalmente los mayores consumidores y generadores de contaminantes ambientales como son la Eurozona, Estados Unidos, China e India. Sabiendo que este proceso es a costa de los países del hemisferio sur.
- b) La propuesta de revertir la producción de vehículos eléctricos: de 10 millones en el año 2022, a pasar a 80 millones en el 2035. El 90 % de la producción mundial
- c) Incrementar la producción de litio 2023-2035 en un 45 %, para satisfacer la demanda automotriz, pero también las demandas de celulares, computadoras, tabletas, etcétera.
- d) Alcanzar la independencia de la cadena de valor para la producción de baterías de litio, principalmente en Europa y Norteamérica.
- e) Aumentar las estaciones de carga para autos eléctricos, las llamadas electrolineras, ya que actualmente están muy limitadas (por ejemplo, en Estados Unidos se contabilizan alrededor de 19 000, y en México no más de 1200).
- f) Aprovechar la coyuntura del *nearshoring* en México, derivado del T-MEC para la producción de autos eléctricos, tanto a nivel de OEM, como de proveeduría de Tier 1 y Tier 2.
- g) Un esfuerzo de las armadoras de carros para reducir el precio de venta de autos eléctricos. (comparadas con las marcas chinas que están en promedio un 30 % más económicas).
- g) Reducción de tasas de interés para crédito automotriz, en especial los carros eléctricos, lo que permitirá el estímulo de su compra.
- h) Desarrollar e implementar estímulos fiscales para compra de vehículos eléctricos, que en realidad impacten y estimulen la compra de vehículos nuevos y la opción de ser eléctricos.
- i) Y no descuidar y mantener una educación cívica para el estímulo y uso de transporte eléctrico, tanto público como privado.

Conclusiones

Como se ha observado, la transición energética automotriz no es ni será una tarea fácil. Hay muchos componentes que obstaculizan esta transición. Desde el interés de las grandes marcas por cambiar este paradigma, que va aunado al gran negocio de hidrocarburos. Pero también influye el desarrollo de tecnología eficaz y accesible al usuario, como es la producción de baterías eléctricas que encarecen la unidad versus los automóviles convencionales que usan combustibles fósiles.

También deben sumarse los gobiernos para estimular, tanto fiscal como cívicamente, el uso de transporte eléctrico, ya sea público o privado. Determinar ventajas considerables de migrar a movilidad eléctrica. Que se vea reflejada en los bolsillos de las empresas y de las personas al adquirir un vehículo eléctrico. Por último, y que debe ser parte fundamental de esta transición: la educación sobre movilidad a bajo costo, menos contaminante y más civilizada. Sin este elemento, difícilmente esta transición se podrá llevar a cabo a mediano plazo como es lo planteado por muchas organizaciones.

Referencias

- AMIA (2024). *Asociación Mexicana de la Industria Automotriz. Electrificación automotriz*. chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpc-glcfindmkaj/https://amia.com.mx/wp-content/uploads/2022/03/electromovilidad28022022-V2.pdf
- Autocosmos (2024). *Venta de automóviles a crédito*. 31/01/2024. <https://noticias.autocosmos.com.mx/2024/01/31/56-de-la-compra-de-autos-nuevos-en-mexico-fue-a-credito-en-2023>
- BMW México (2024). *Planta de producción de baterías*. <https://www.bmwgroup-werke.com/san-luis-potosi/es.html>
- DW (2023). *Deutsche Welle. Nacionalización del litio en México: una oportunidad Perdida*. <https://www.dw.com/es/nacionalizacion/C3%B3n-del-litio-en-m%C3%A9xico-una-oportunidad-perdida/a-64792240#:~:text=235.000%20hect%C3%A1reas%20en%20Sonora%20se,la%20totalidad%20de%20los%20recursos>.

- Expansión (2022). *Producción de baterías de litio*. <https://expansion.mx/empresas/2022/10/31/produccion-baterias-litio-problemas-cadena-de-suministro>
- Ford motor Company (2024). *Legado de la Ford motor Company*. <https://www.ford.es/experiencia-ford/noticias-ford/nuestro-legado#>
- Forbes (2023). *El T-MEC y la industria automotriz*. <https://forbes.com.mx/el-t-mec-y-la-industria-automotriz/>
- Futuro Sustentable (2023). *El sodio se posiciona como una de las mejores alternativas al litio en las baterías eléctricas*. <https://www.futurosustentable.com.ar/el-sodio-se-posiciona-como-una-de-las-mejores-alternativas-al-litio-en-las-baterias-electricas/>
- Iberdrola (2022). *Huella de carbono*. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/huella-de-carbono>
- Los Angeles Times (2024). *Llegada de vehículos chinos a México*. 01/07/2024. <https://www.latimes.com/espanol/mexico/articulo/2024-07-01/preocupa-a-industria-automotriz-de-eeuu-potencial-llegada-de-ev-chinos-de-bajo-precio-desde-mexico>
- Mansur-Solar (2024). *El impacto ambiental de la industria automotriz*. <https://www.mansur-solar.com/2023/10/impacto-ambiental-industria-automotriz-y-energia-limpia/#:~:text=La%20industria%20automotriz%20es%20responsable,o%20la%20generaci%C3%B3n%20de%20energ%C3%ADa.>
- Murillo-Villanueva, B., & Carbajal Suárez, Y. (2023). Industria automotriz en la región del TLCAN. Un análisis del valor agregado en las exportaciones bilaterales. *Nóesis. Revista De Ciencias Sociales Y Humanidades*, 32(63), 47–66. <https://doi.org/10.20983/noesis.2023.1.3>
- MURAL (2024). Periódico MURAL. Automotriz. Sábado 14/09/2024. P. 2
- Navarrete-Báez, F. (2016). *The Impact of the NAFTA over the Canadian Automotive Industry throughout 20 Years*. Interfaces Brasil-Canadá. v. 16, n. 2, p. 144-161.
- NEURON (2022). *La transformación del crédito automotriz*. <https://neuronbusinessmedia.mx/la-transformacion-del-credito-automotriz/>
- OICA (2022). *International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. Fuentes generadoras de CO2*. <https://www.oica.net/category/auto-and-fuels/>

S&P Global Mobility (2024). *Automotive Industry climate physical risk assessment*. https://www.spglobal.com/mobility/en/products/automotive-physical-risk.html?utm_source=google&utm_medium=ppc&utm_campaign=PC026077&utm_term=s&p%20global%20mobility&utm_network=g&device=c&matchtype=e&gclid=EAIaI-QobChMIw-Gzl7PwiQMVJzbUAR0qhwdOEAAAYASAAEgKiZ-vD_BwE

STATISTA (2023). *La importancia de la industria automotriz en México*. <https://es.statista.com/temas/6404/la-industria-automotriz-en-mexico/#topicOverview>

Capítulo 6

Calentamiento de agua en albercas con energía solar térmica una alternativa para obtener energía asequible y no contaminante

Maximiliano Rivera-Mendoza¹

maxrivera56@hotmail.com

Alejandro Garza Galicia²

biogas2005@hotmail.com

Virgilio Zúñiga Grajeda¹

virgilio.zuniga@academicos.udg.mx

Belkis Sulbarán-Rangel¹

Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20252007>



¹ Centro Universitario de Tonalá Universidad de Guadalajara

² Universidad del Valle de Atemajac Campus Guadalajara

Resumen

La energía es el elemento clave del desarrollo moderno y los combustibles fósiles son actualmente la principal fuente de energía consumida en todo el mundo y esto no es sostenible. La demanda de energía se ha incrementado debido al crecimiento demográfico y al crecimiento de las urbes; debido a esto, la sociedad y la economía dependen significativamente de la energía disponible. Esto ha hecho que en los últimos años el planeta haya incrementado su temperatura, debido a que gran parte de la energía consumida proviene de la combustión de hidrocarburos, que ocasionan la emisión de gases de efecto invernadero, los efectos de estos sobre la salud, así como la actividad del ser humano ha incrementado la deforestación de grandes extensiones de selvas y bosques, dejando un futuro incierto y desolador, es por eso, que la utilización de energías renovables, como la energía solar, que sustituyan el uso de combustibles de fósiles sea una alternativa viable y benéfica para el medioambiente. El aumento de la eficiencia general de la conversión y el uso de energía renovables es una opción. Además, explorar nuevos sistemas con una mejor utilización de los recursos renovables puede ser una posible opción sostenible futura. Es importante incrementar el estudio e investigación de la energía renovable, principalmente para reemplazar el uso de la energía producida por la combustión de hidrocarburos, debido a que la reserva de estos combustibles está decreciendo. En el marco del cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible, esta investigación tiene como objetivos mostrar los conceptos básicos sobre los fenómenos termodinámicos que implica el uso de energía solar térmica para el calentamiento de agua en albercas, con el fin de visualizar a esta energía como una alternativa para garantizar el acceso a una energía asequible, segura y sostenible.

Introducción

La energía termosolar es también una alternativa técnica y económicamente factible para el calentamiento de agua, cuando se diseña de manera adecuada, ya que se han reportado casos de fracaso debido a que no se consideraron variables termodinámicas para suplir la necesidad energética con esta tecnología y han resultado no rentables (Escobedo-Bretado, Nájera-Trejo y Martín-Domínguez, 2015; Lugo, Morales, Best, Gómez, y García-Valladares, 2019). Se han reportado varias publicaciones en donde han desarrollado expresión analítica para la eficiencia de sistemas de calentamiento compuestos por colectores, una bomba y un intercambiador de calor (Starke, Cardemil y Colle, 2018; Tiwari y Sharma, 1991). Otros estudios se han dedicado al cálculo del flujo de evaporación de agua en albercas abiertas (Asdrubali, 2009), al desarrollo de simulación dinámica para evaluar el comportamiento térmico del calentamiento de la alberca (Ratajczak y Szczechowiak, 2020).

En cuanto a albercas abiertas o al aire libre, han reportado modelos matemáticos con el uso de herramientas computacionales como el TRNSYS para simular el rendimiento de una calefacción solar (Lugo et al., 2019) con validación de los modelos utilizando los valores del coeficiente de evaporación y el coeficiente de la relación entre la evaporación y el calor perdido por convección (Zsembinszki, Farid y Cabeza, 2012). En otra investigación se propone una estructura híbrida que integre modelos termodinámicos para albercas y redes neuronales artificiales (RNA) (Santos, Zárate y Pereira, 2013). Así como se han presentado análisis del comportamiento transitorio de la temperatura del agua en una alberca municipal, realizando balances de energía acoplados en estado cuasi-dinámico (Dorantes, Hincapié y Muñoz, 2015). Los resultados en albercas abiertas muestran que, en general, el modelo tiene un comportamiento aceptable en el rango de 21 a 26°C, con un máximo error de 1°C, y no es suficientemente aceptable para temperaturas arriba de 28°C (Haaf, Luboschik y Tesche, 1994). También se han investigado modelos analíticos para el cálculo de sistemas de calentamiento solar para albercas abiertas y cerradas desarrollados para la misma alberca para determinar la mejor manera para su uso, para todo el año en albercas de medidas similares (Fahmy, Farghally y Ahmed, 2014).

De acuerdo con lo antes expuesto, en esta investigación se desarrollan los conceptos básicos del análisis termodinámico de un sistema de producción de energía solar térmica para mantener la temperatura de un flujo continuo en una instalación hidráulica como una alberca. A pesar de los múltiples beneficios que tiene la energía solar, en la actualidad no se utiliza eficientemente debido a altos costos de inversión inicial y a la falta de análisis integral de todos los componentes del sistema (Lugo et al., 2019) antes de su implementación; por tanto, es importante hacer un análisis termodinámico del sistema que producirá energía térmica para el calentamiento de agua y así hacerlo más eficiente (Chow, Bai, Fong y Lin, 2012; Dongellini, Falcioni, Martelli y Morini, 2015; D. Katsaprakakis, 2019). La energía solar es una energía renovable amigable con el medioambiente, ya que no genera contaminación, está disponible durante las horas del día y, mediante el uso de diferentes componentes, puede ser utilizada con eficiencia para el calentamiento del agua necesaria para una instalación hidráulica (D. A. Katsaprakakis, 2015). Por tanto, en este capítulo se presenta una recopilación de información sobre los principios termodinámicos para la evaluación del calentamiento de agua en una alberca y las recientes tendencias en el modelado de variables para fomentar el uso de la energía solar térmica como una alternativa para obtener energía asequible y no contaminante.

Principios termodinámicos para la evaluación del calentamiento de agua en una alberca

La climatización de albercas de forma eficiente ha tomado relevancia por la necesidad de protección del medioambiente y ahorro de energía. Ha aumentado con el paso del tiempo debido al desarrollo de nuevas tecnologías. Las investigaciones en la materia pueden reducirse a tres grandes temas, basados en su contribución y principios termodinámicos. Primero, mejoras, si la investigación sugiere adaptaciones al sistema existente. Segundo, modelado, si ello ofrece nuevos modelos analíticos que mejoren y/o describan mejor el fenómeno relevante respecto al cálculo y diseño del sistema de calentamiento de la alberca. Verificación, si con ello se estudia y verifica cada modelo. Además, la investigación puede

ser categorizada basada en el objeto de estudio, a saber, albercas abiertas, cerradas o la investigación de ambas (abiertas y cerradas).

Tomando la información de Auer, T. (1996) de software TRNSYS-TYPE 344, el principio físico básico supone que el agua en una alberca se mezcla idealmente para que la primera ley de la termodinámica se pueda expresar con la ecuación (1).

$$\frac{dH}{dt} = \sum (Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}) \quad (1)$$

Dónde:

dH/dt = cambio de entalpía en el agua de la alberca en el tiempo

Q_{entrada} = flujo de calor hacia el agua de la alberca

Q_{salida} = flujo de calor desde el agua de la alberca.

También se puede suponer que un líquido es incompresible y que la densidad y la conductividad térmica son constantes. La Ec. 12 se puede expresar como la ecuación (2):

$$\rho_{\text{agua}} * C_{P \text{ agua}} * V_{\text{Alberca}} * \frac{dH}{dt} = \sum (Q_{\text{Entrada}} - Q_{\text{salida}}) \quad (2)$$

Dónde:

ρ_{Agua} = densidad del agua

$C_{P \text{ agua}}$ = calor específico de agua

V_{Alberca} = volumen de la alberca

Al elaborar el modelo, se supuso además que hay una cantidad constante de agua en la alberca. La Figura 1 muestra una vista esquemática de todos los flujos de calor presentes en una alberca.

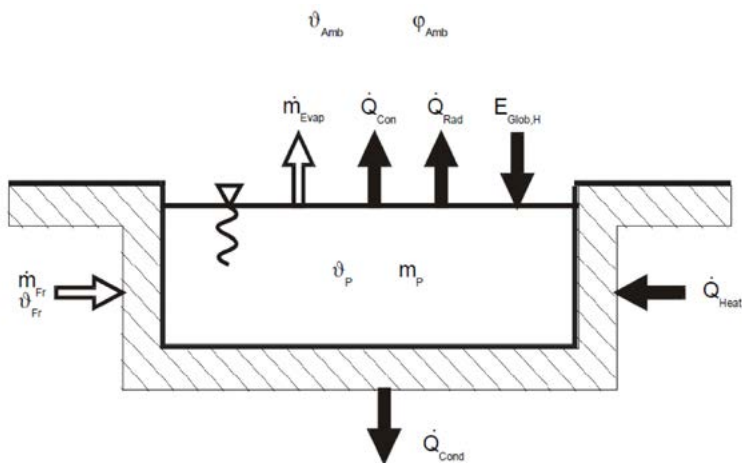


Figura 1. Tomado de tasas de flujo másico y de calor de una alberca en intercambio del ambiente (Auer, 1996)

El intercambio de calor con el entorno incluye lo siguiente:

- Tasa de flujo de calor por evaporación
- Tasa de flujo de calor por convección.
- Tasa de flujo de calor por radiación de onda corta.
- Tasa de flujo de calor por radiación de onda larga
- Pérdida de calor por suministro de agua dulce.
- Tasa de flujo de calor por calentamiento
- Conducción térmica al suelo.

La tasa de flujo de calor al suelo es insignificante para esta evaluación. Las albercas interiores normalmente están rodeadas de salas de ingeniería en el sótano con temperaturas ambiente generalmente superiores a 30 ° C, de modo que la tasa de flujo de calor es prácticamente cero. Para las albercas al aire libre, este aspecto puede ignorarse porque, por un lado, solo tiene una influencia menor en la evaluación general de la energía (<1 %) y, por otro, porque no se puede calcular con precisión ($Q_{cond} = f$ (aislamiento térmico, composición del suelo)).

En la siguiente sección, cada tasa de flujo de calor se calcula en detalle.

Cálculo de la tasa de flujo de calor por evaporación

La pérdida de calor por evaporación se puede calcular sobre la base de la tasa de flujo másico evaporado con la ecuación (3).

$$Q_{Evap} = m_{Evap} * \Delta h_{Evap} \quad (3)$$

La tasa de flujo másico evaporado se puede determinar con una fórmula para el cálculo de una fuerza motriz. La fuerza impulsora es la diferencia en la presión del vapor de agua entre la superficie del agua y los alrededores, y se supone que una capa directamente sobre la superficie del agua, a la temperatura del agua de la alberca, tiene una humedad relativa del 100%. Para una alberca cubierta, la tasa de flujo másico evaporado se puede calcular con la ecuación (4).

$$m_{Evap} = \varepsilon * A_{total} * (p_{Sat}(v_P) - p_{St}(v_{Amb})) \quad (4)$$

La presión de vapor en condiciones ambientales se puede calcular utilizando la humedad relativa determinada por la ecuación (5).

$$p_{Sat} = \varphi_{Amb} * p_{Sat}(v_{Amb}) \quad (5)$$

La relación de evaporación para una alberca al aire libre se basa en una fórmula empírica, por la cual el coeficiente de evaporación total y la entalpía de evaporación se combinan para que el caudal de calor por evaporación se pueda calcular con la ecuación (6).

$$Q_{Evap} = A_{Evap} * \alpha_{Evap} * (p_{Sat}(v_P) - p_{St}(v_{Amb})) \quad (6)$$

El coeficiente de evaporación modificado se puede calcular con la ecuación (7).

$$\alpha_{Evap} = 50.58 + 66.9 * w_{Amb}^{0.5} \quad (7)$$

Cálculo de la tasa de flujo de calor por convección

La tasa de flujo de calor por convección se puede calcular sobre la base de la fórmula de Newton, ecuación (8).

$$Q_{Con} = \alpha * A_{total} * (v_P - v_{Amb}) \quad (8)$$

Según las mediciones de Biasin, la fórmula de Lewis para la transferencia de masa y calor se puede usar para albercas cubiertas, de modo que la relación entre el calor y los coeficientes de transferencia de masa se puede determinar con la ecuación (9) (Biasin, 1987).

$$\frac{\alpha}{\beta} = c_{pl} * p_l * \left(\frac{a}{St} \right) \quad (9)$$

El coeficiente de transferencia de calor para una alberca al aire libre se puede calcular sobre la base de la ecuación (10).

$$\alpha = 3.1 + 4.1 * w_{Amb} \quad (10)$$

Cálculo de la tasa de flujo de calor por radiación de onda larga

La tasa de transferencia de calor por intercambio de radiación de onda larga con las paredes (albercas cubiertas) o el cielo (albercas al aire libre) se puede calcular sobre la base de la ley Stefan-Boltzmann. Para la alberca cubierta, se puede suponer que la alberca está completamente cerrada, y para la alberca al aire libre, suponemos que la superficie del “cielo” es grande en comparación con la de la alberca. Por lo tanto, en ambos casos, la tasa de flujo de calor por radiación de onda larga se reduce a la

tasa de flujo de calor a un radiador completo. Por lo tanto, la relación se puede expresar mediante la ecuación (11).

$$Q_{Rad} = A_{total} * \varepsilon_w^* * \sigma * (T_p^4 - T_X^4) \quad (11)$$

Donde X puede representar tanto la Pared como el Cielo. Las constantes tienen los siguientes valores:

$$\varepsilon_w^* = 0.9$$

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$$

Cálculo de la pérdida de calor por suministro de agua dulce

La pérdida de calor por el suministro de agua dulce se puede calcular utilizando la primera ley de la termodinámica bajo el supuesto de un líquido incompresible con la ecuación (12).

$$Q_{Fr} = m_{Fr} * c_{p,W} * (v_p - v_{Fr}) \quad (12)$$

Cálculo de la tasa de flujo de calor por ganancia térmica de onda corta

La ganancia térmica de onda corta de la radiación solar total en una superficie horizontal para una alberca al aire libre se puede calcular con la ecuación (13).

$$Q_{Sol} = \varepsilon_w^* * A_{total} * E_{Glob,H} \quad (13)$$

La ganancia térmica de onda corta para una alberca cubierta debe determinarse de manera diferente.

Cálculo de la transferencia de flujo de calor de la calefacción auxiliar

De manera análoga a la pérdida de calor por el suministro de agua dulce, la tasa de flujo de calor del calentamiento auxiliar se puede calcular con la ecuación (14).

$$Q_{Entrada} = m_{In} * c_{p,W} * (v_p - v_{In}) \quad (14)$$

Cálculo de energía almacenada

Para un balance energético completo, se debe considerar la diferencia de temperatura entre las condiciones iniciales y finales. La energía almacenada se puede calcular con la ecuación (15).

$$dE = m_p * c_{p,w} * (v_{p,0} - v_p) \quad (15)$$

Pérdida de calor de una alberca cubierta

Si la superficie del agua de una alberca está cubierta, la pérdida de calor se reduce, principalmente porque la cubierta evita la evaporación. La Figura 2 muestra una vista esquemática de todos los flujos de calor. La tasa de flujo de calor para una superficie de agua cubierta se reduce a una parte convectiva, una tasa de flujo de calor de onda corta y de onda larga que da como resultado una temperatura dada en la parte superior de la cubierta.

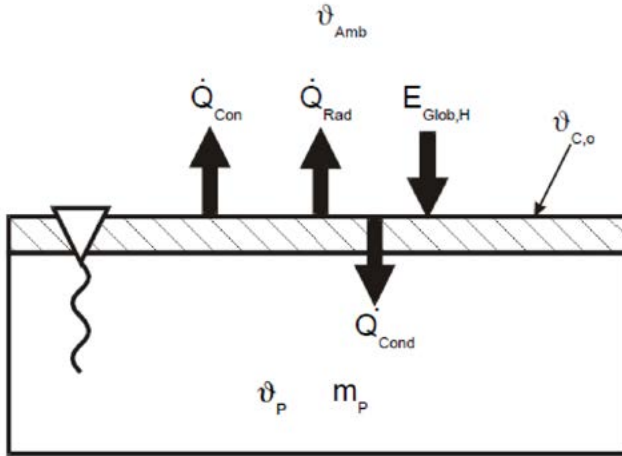


Figura 2. Tomado de tasas de flujo de calor de una cubierta de alberca (Auer, 1996).

Se supone que se forma un perfil de temperatura estacionario en cualquier momento, debido a la masa de la cubierta. Por lo tanto, el equilibrio térmico lento de la cubierta se puede reducir a la ecuación (16).

$$Q_{Entrada} = m_{In} * c_{p,W} * (v_p - v_{In}) \quad (14)$$

Con respecto a la temperatura en la parte superior de la cubierta, cada flujo de calor se puede expresar con las ecuaciones (17), (18) (19) y (20):

$$Q_{Con} = \alpha * A_{Cov} * (v_{C,0} - v_{Amb}) \quad (17)$$

$$Q_{Rad} = A_{Cov} * \varepsilon_{Cov}^* * \sigma * (T_{C,0}^A - T_X^A) \quad (18)$$

$$Q_{Cond} = \frac{\lambda_{Cov}}{\delta_{Cov}} * A_{Cov} * (v_{C,0} - v_p) \quad (19)$$

$$Q_{Sol} = A_{Cov} * \varepsilon_{Cov}^* * E_{glob,H} \quad (20)$$

Modelado de variables para el calentamiento de agua en una alberca

Las albercas cubiertas y al aire libre están sujetas a entornos muy diferentes, lo que conduce a diferentes pérdidas y ganancias de calor. Se han determinado las principales características de contorno que afectan al calentamiento de las albercas cubiertas o al aire libre (Tabla 1).

Tabla 1. *Mecanismos de pérdidas y ganancias pasivas de calor de albercas cubiertas y al aire libre (Dannemand, Furbo, Heller, Andersen, y Madsen, 2017)*

Alberca al aire libre	Alberca cubierta
Las ganancias solares son directas	Poca o nula ganancia solar directa
Depende de condiciones de humedad del aire ambiente; esto genera grandes pérdidas por evaporación	La humedad es controlada y las pérdidas por evaporación afectan por el clima interior
La temperatura del ambiente es igual a pérdidas o ganancias por convección	La temperatura del aire interior está relativamente cerca de la piscina. Existe baja transferencia de calor por convección.
El viento natural genera grandes pérdidas por convección	Se tienen tasas de ventilación controladas con poca velocidad del aire; pueden ocasionar pequeñas pérdidas de calor por convección.
Las bajas temperaturas del cielo influyen en pérdidas por radiación infrarroja	Superficies de estructuras de edificios circundantes cerca de la temperatura de la piscina podrían influir de manera muy baja en las pérdidas por radiación infrarrojos.
Cuando llueve se agrega agua más fría y puede ocasionar perdidas	Puede haber pérdidas por mezcla de agua más fría cuando se agrega para rellenar la alberca.

A continuación se presentan investigaciones sobre metodologías aplicadas a la estimación de necesidades de energía del calentamiento de albercas y la adopción de estrategias de conservación de energía para albercas cubiertas, al aire o abiertas y mixtas (Dannemand et al.; Jimenez, Carrillo y Alvarado, 2015).

Albercas cubiertas

Tiwari G. N. y Sharma S. B. 1991 desarrollaron una expresión analítica para la eficiencia de sistemas de calentamiento compuestos por colectores, una bomba y un intercambiador de calor (Tiwari y Sharma, 1991). Asdrubali F. 2009 calculó el flujo de evaporación de agua en albercas abiertas usando investigación experimental con varias condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. Para controlar esas variables, los rangos de evaporación del agua, obtenidos por un modelo matemático sugerido en este artículo, fueron comparados contra otros modelos. El modelo que tuvo la mayor concordancia fue el que tenía valores con validez experimental; aunque la evaluación del coeficiente k en la ecuación para calcular el rango de evaporación tenía un error de aproximadamente 10 %, representando 7 % del total de la pérdida de calor (Asdrubali, 2009). Ratajczak et al. 2020 desarrolló un sistema de simulación dinámica para evaluar el comportamiento térmico del calentamiento de la alberca. Los autores propusieron dividir la alberca en diferentes zonas y realizaron un análisis complejo del consumo de energía eléctrica y térmica del sistema de ventilación de acuerdo con el algoritmo de control de unidades propuesto, utilizando datos climáticos de Polonia. Debido al clima de Polonia, la energía solar no se incluye en los cálculos, ya que no sería eficiente hacerlo (Ratajczak y Szczechowiak, 2020).

Albercas abiertas o al aire libre

Lugo et al. 2019 presentó un modelo matemático desarrollado en TRNSYS para simular el rendimiento de una calefacción solar. El sistema fue para una alberca al aire libre en regiones con un clima cálido. Para ello, se desarrolló un nuevo type de TRNSYS. El modelo fue validado usando datos experimentales recolectados de una alberca al aire libre de 53.8 m³ en Cuernavaca, Morelos, México. Los datos utilizados para confirmar los componentes del modelo y el modelo completo se recopilaron entre marzo de 2016 y junio de 2017. Esta alberca está ubicada en un hotel rodeado de árboles y vegetación que provocan sombra en la

superficie de la alberca durante todo el día, reduciendo así la ganancia de calor de radiación solar directa. El modelo se desarrolló y validó en una ecuación con un factor de sombreado para la alberca y considerando las variaciones en la temperatura de la alberca. Para evaluar las pérdidas por evaporación, se probaron seis correlaciones empíricas obtenidas de la literatura. Encontraron que el modelo reproducía adecuadamente la temperatura de la alberca en diferentes condiciones de trabajo, y que esto puede ser una herramienta valiosa para generar un análisis técnico y económico de los sistemas de calefacción solar en albercas al aire libre para regiones con condiciones climáticas similares (Lugo et al., 2019).

Otro trabajo interesante fue el reportado por Dorantes et al., 2015, en el cual se llevó a cabo un análisis del comportamiento transitorio de la temperatura del agua en una alberca municipal, utilizando como medio de calefacción un campo de colectores de tubos concéntricos no presurizados, instalado en la ciudad de Sogamoso. Colombia. En esta investigación se han realizado dos balances energéticos acoplados en estado cuasi-dinámico. El primer balance fue tomando el volumen de control de un tanque de almacenamiento térmico, conectado a los colectores de tubos concéntricos, y el segundo balance fue sobre el volumen de control, la propia alberca, tomando datos meteorológicos reales y condiciones de trabajo necesarias y típicas para operar un sistema de calentamiento térmico común de agua en una alberca. Llegaron a un modelo físico-matemático que describe el comportamiento térmico real de todo el sistema. También realizaron un estudio de sensibilidad del sistema a partir de los resultados para determinar las variables que influyen en el equilibrio del sistema termodinámico y determinar bajo qué circunstancias el modelo es capaz de simular de manera real el comportamiento térmico del agua de la alberca (Dorantes et al., 2015).

En otra investigación, Santos et al. 2013 propone una estructura híbrida que integre modelos termodinámicos para albercas y redes neuronales artificiales (RNA). La RNA recibe información del clima de las regiones donde las albercas serán instaladas. La variación de la temperatura ambiente de la ciudad fue determinada analíticamente y comparada con las medidas meteorológicas en un tiempo en 2011 para el mismo día y localización, mostrando que los valores de la temperatura ambiente

fueron calculados con una variación máxima de 2 °C por validación; tres procesos fueron tomados en cuenta (Santos et al., 2013).

Por otro lado, cuando el clima es bueno y la temperatura del agua es tibia, para alcanzar un nivel confortable, los materiales de cambio de fase tienen el efecto de reducir la temperatura por la absorción de exceso de calor. Similarmente, en otra investigación proponen un modelo numérico para albercas con un balance de energía que considera el volumen del agua y el número de nadadores por día. Para la validación del modelo, es necesario definir el valor del coeficiente de evaporación (a , b) y el coeficiente de la relación entre la evaporación y el calor perdido por convección (cv), simulado usando TRYNSYS (Zsembinszki et al., 2012). Anteriormente, Haaf W. et al., 1994, había desarrollado y validado un modelo para albercas abiertas con una mínima superficie y profundidad de 100 m y 0.5 m, respectivamente. Los resultados muestran que, en general, el modelo tiene un comportamiento aceptable en el rango de 21 a 26°C, con un máximo error de 1°C, y no es suficientemente aceptable para temperaturas arriba de 28°C (Haaf et al., 1994).

Albercas mixtas

Se ha investigados modelos analíticos para el cálculo de sistemas de calentamiento solar para albercas abiertas y cerradas desarrollados para la misma alberca para determinar la mejor manera para su uso, para todo el año en albercas de medidas similares. En el criterio del área de colección, cinco métodos se ofrecen para estimar cantidad correcta de colección. Los resultados demostraron que la implementación de sistemas híbridos diésel-solar proveen mayor eficiencia y economía, si se usa una cubierta (Fahmy et al., 2014).

Conclusiones

La energía del sol se puede utilizar directamente para calentar espacios y agua, procesos industriales, secado de alimentos y tratamiento de aguas residuales, entre otros usos. Cuando los colectores solares se combinan con enfriadores de absorción o adsorción, la energía solar también se puede utilizar para enfriar. Los sistemas solares de calentamiento de agua en casas unifamiliares y viviendas multifamiliares representan el mayor uso de calor solar térmico, casi el 90 por ciento de la capacidad instalada en 2018, mientras que las redes de calefacción de distrito, los procesos industriales y la calefacción y refrigeración de espacios representan solo el 4 por ciento. Los calentadores de agua solares pueden reducir sustancialmente las facturas de energía al tiempo que crean empleos e industrias locales.

La energía solar térmica también tiene un gran potencial para la climatización, ya que la mayor demanda de refrigeración coincide con el mayor potencial solar. Pero el uso de la energía solar térmica para tales fines requiere el apoyo de proyectos de investigación y demostración para superar las barreras técnicas. Si bien es altamente competitivo en costos en función del ciclo de vida, según la región y la aplicación, la mayoría de los sistemas solares térmicos tienen altos costos iniciales. Las políticas de apoyo efectivas incluyen incentivos fiscales y financieros como préstamos, subvenciones, créditos fiscales o subsidios, combinados con objetivos, mandatos y códigos de construcción para aumentar el tamaño del mercado, así como esfuerzos de concienciación pública para aumentar el interés y la demanda.

Referencias

- Asdrubali, F. (2009). A scale model to evaluate water evaporation from indoor swimming pools. *Energy and Buildings*, 41(3), 311-319. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.001>
- Auer, T. (1996). *TRNSYS-TYPE 344. Assessment of an indoor or outdoor swimming pool*. In *TRANSSOLAR* (Ed.), Strategies for energy efficient design and thermal comfort in buildings. Energietechnik GmbH.
- Biasin, K. (1987). *Die Wasserverdunstung nichtbenutzter Becken im Hallenbad*. *Fortschritt-Bericht, VDI-Reihe*. VDI-Verlag, 19(17).
- Chow, T. T., Bai, Y., Fong, K. F., & Lin, Z. (2012). Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating. *Applied Energy*, 100, 309-317. doi:10.1016/j.apenergy.2012.05.058
- Dannemand, M., Furbo, S., Heller, A., Andersen, C. A., & Madsen, H. (2017). *Heating of indoor swimming pools by solar thermal collectors in summerhouses in Denmark*. 39.
- Dongellini, M., Falcioni, S., Martelli, A., & Morini, G. L. (2015). Dynamic Simulation of Outdoor Swimming Pool Solar Heating. *Energy Procedia*, 81, 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.053>
- Dorantes, R., Hincapié, Z., & Muñoz, B. (2015). *Estudio teórico-experimental del comportamiento térmico de una piscina calentada con energía solar*. Memoria del Congreso XXXIX Semana Naional de Energía Solar 2015. doi:10.13140/RG.2.1.4670.3449
- Escobedo-Bretado, J. A., Nájera-Trejo, M., & Martín-Domínguez, I. R. (2015). *Análisis técnico-económico de un sistema de calentamiento solar para una alberca semi-olímpica en la ciudad de Durango, mediante simulación dinámica en TRNSYS*. Paper presented at the XXXIX Semana Nacional de Energía Solar, Mexico.
- Fahmy, F. H., Farghally, H. M., & Ahmed, N. M. (2014). Swimming Pool System Based on Geothermal Energy in Egypt. *Journal of Next Generation Information Technology(JNIT)*, 5(1), 27-40.
- Haaf, W., Luboschik, U., & Tesche, B. (1994). Solar swimming pool heating: Description of a validated model. *Solar Energy*, 53(1), 41-46. doi:[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(94\)90603-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(94)90603-3)

- Jimenez, S. A., Carrillo, V., & Alvarado, M. A. (2015). *Swimming Pool heating systems: A review of applied models*. 2015, 10(19), 10. doi:10.18180/tecciencia.2015.19.4
- Katsaprakakis, D. (2019). Introducing a solar-combi system for hot water production and swimming pools heating in the Pancretan Stadium, Crete, Greece. *Energy Procedia*, 159, 174-179. doi:10.1016/j.egypro.2018.12.047
- Katsaprakakis, D. A. (2015). Comparison of swimming pools alternative passive and active heating systems based on renewable energy sources in Southern Europe. *Energy*, 81, 738-753. doi:10.1016/j.energy.2015.01.019
- Lugo, S., Morales, L. I., Best, R., Gómez, V. H., & García-Valladares, O. (2019). Numerical simulation and experimental validation of an outdoor-swimming-pool solar heating system in warm climates. *Solar Energy*, 189, 45-56. doi:10.1016/j.solener.2019.07.041
- Ratajczak, K., & Szczechowiak, E. (2020). Energy consumption decreasing strategy for indoor swimming pools – Decentralized Ventilation system with a heat pump. *Energy and Buildings*, 206, 109574. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109574
- Santos, E. T., Zárate, L. E., & Pereira, E. M. D. (2013). Hybrid thermal model for swimming pools based on artificial neural networks for southeast region of Brazil. *Expert Systems with Applications*, 40(8), 3106-3120. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.026
- Starke, A. R., Cardemil, J. M., & Colle, S. (2018). Multi-objective optimization of a solar-assisted heat pump for swimming pool heating using genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 142, 118-126. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.067
- Tiwari, G. N., & Sharma, S. B. (1991). Design parameters for indoor swimming-pool heating using solar energy. *Energy*, 16(6), 971-975. doi:https://doi.org/10.1016/0360-5442(91)90049-R
- Zsembinszki, G., Farid, M. M., & Cabeza, L. F. (2012). Analysis of implementing phase change materials in open-air swimming pools. *Solar Energy*, 86(1), 567-577. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.10.028

Capítulo 7

Diseño bioclimático: análisis bibliométrico

Francisco Javier Sol Sampedro¹

aztlan20991@gmail.com

Aracely López Grijalva¹

aracely.lopez@unicach.mx

Raúl Pavel Ruíz Torr²

raul.ruiz@unach.mx

Imer López Grijalva³

imer.lg@regionsierra.tecnm.mx

Xochitl Berenise Gonzales Torres⁴

xbgt77@gmail.com

<https://doi.org/10.61728/AE20252014>



¹ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

² Universidad Autónoma de Chiapas

³ Tecnológico Nacional de México - ITS de la Región Sierra

⁴ Instituto Tecnológico de Oaxaca/ Tecnológico Nacional de México

Resumen

Hoy en día, el estudio y análisis de la producción científica se ha realizado a través de los análisis bibliométricos. Entendiendo que la bibliometría es la aplicación de las matemáticas y métodos estadísticos a fuentes escritas, estos análisis consideran indicadores como autores, título de la publicación, tipo de documento, idioma, resumen y palabras claves o descriptores. En este trabajo se generó la bibliometría para la variable diseño bioclimático, teniendo en cuenta que el diseño bioclimático involucra al diseño arquitectónico que utiliza energía solar y otros recursos ambientales para generar confort térmico a los usuarios en interiores y exteriores y mejorar la eficiencia energética en los edificios, para lo cual se consideran los indicadores número de publicaciones del ítem periodo 1980-2023 y número de citas por autor. También, usando el software VOSviewer, se construyeron los mapeos de las interrelaciones de ítems, correlaciones del ítem y correlaciones temporales del ítem, identificando las interrelaciones entre los diferentes ítems con la variable. Se analizaron 372 artículos en un periodo de 44 años. La investigación determinó que la cantidad de publicaciones está relacionada con los requerimientos de solución con respecto a las demandas del cuidado del medioambiente natural y la salud de la población mundial, también muy relacionadas con eventos temporales. De igual manera la variable ámbitos donde el diseño bioclimático muestra correlaciones fuertes con los ítems Diseño arquitectónico, Eficiencia energética, utilización de la energía, arquitectura bioclimática, Edificios, Microclima y Sustentabilidad mismos que participa con el cuidado en el uso de recursos y en la generación bienestar de los usuarios de espacios habitables través de medios pasivos de acondicionamiento térmico en edificaciones.

Introducción

Los estudios métricos de la información permiten explorar, detectar y también mostrar datos relevantes y significativos de grandes bases de datos y documentos, otorgándole un enfoque objetivo a través de información cuantitativa. La medición del esfuerzo y repercusión de la actividad científica se basa hoy en día en la bibliometría (Licea, 2002), la cual es un mecanismo fundamental que permite el análisis de la producción científica y demuestra el comportamiento de diferentes indicadores de la actividad científica (González, 2012).

La bibliometría es la aplicación de las matemáticas y métodos estadísticos a toda fuente escrita que esté basada en las facetas de la comunicación y que considere los elementos tales como autores, título de la publicación, tipo de documento, idioma, resumen y palabras claves o descriptores (Solano, 2009).

En este trabajo se generó la bibliometría para la variable diseño bioclimático, para lo cual se consideran los indicadores número de publicaciones del ítem periodo 1980-2023 y número de citas por autor; también se construyeron los mapeos de las interrelaciones de ítems, correlaciones del ítem y correlaciones temporales del ítem, identificando las interrelaciones entre los diferentes ítems con la variable diseño bioclimático.

Revisión de la literatura

Bienvenido (2021) describe: en el tiempo, ya sea a través del conocimiento tradicional o de la implementación constructiva, se ha ido desarrollando la relación del entorno construido con las condiciones climáticas de un determinado lugar. De igual manera comenta, que el control de estas soluciones simbióticas basadas en un diseño que considera al clima y su enfoque estratégico se ha desarrollado para brindar mejores niveles de bienestar.

La arquitectura bioclimática ha sido ampliamente aceptada desde los años 1970; esta implementación de sus principios en la práctica es un factor clave para lograr la eficiencia energética en el sector de la construcción (Karkanias y Boemi, 2010). La construcción sustentable es una idea que

busca diseños de edificios que sean compatibles con el medioambiente y la conservación de los recursos durante su vida útil (Elshafei, Vilcekova, Zelenakova, y Negm, 2021). Estos objetivos amplían y complementan las preocupaciones económicas, de utilidad, de durabilidad y de confort del diseño de edificios clásico. Los edificios ecológicos tienen como objetivo minimizar los efectos indeseables totales de la construcción ambiental sobre la salud humana y el medioambiente.

El diseño bioclimático se refiere a un enfoque de diseño arquitectónico que utiliza energía solar y otros recursos ambientales relacionados para proporcionar confort térmico humano en interiores y exteriores (Abdollah, 2019). En tanto, Ness y Andresen y Kleiven (2019) afirman que el Building Bioclimatic Design (BBCD) entiende la arquitectura como un filtro entre el clima exterior y el confort interior, por tanto, BBCD representa una estrategia fundamental para mejorar la eficiencia energética en los edificios.

Metodología

Se realiza un estudio bibliométrico, descriptivo y de interrelaciones de ítems con la variable Diseño Bioclimático; se analizaron publicaciones de un periodo de 44 años comprendido del año 1980 al año 2023. Esta información fue descargada en formato CSV de la base de datos de Scopus.

La información se procesó con Microsoft Excel y VOSviewer para generar los gráficos y mapeos de análisis puntual de acuerdo al indicador. Estas fuentes incluyeron el título de la revista, la fecha de publicación, los detalles del autor (nombre, afiliación, ID del autor), título del artículo, palabras clave, resumen y número de citas.

En la Figura 1 se observa el diagrama de flujo de la metodología, fundamentada en Noriega (2023), que consta de 6 pasos: Definición del campo de estudio, selección de base de datos, proceso de búsqueda, exportación de datos, procesamiento de datos y análisis de resultados.

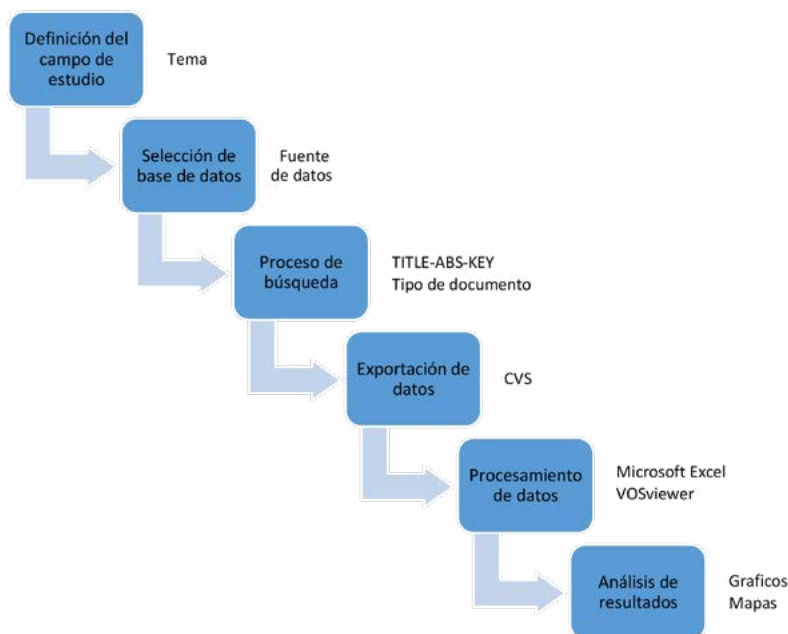


Figura 1. Diagrama de flujo metodología.

Fuente: elaboración propia basado en Noriega (2023).

Resultados

La búsqueda arrojó un total de 372 artículos que contienen el concepto Diseño bioclimático; primeramente, se analizó el número de publicaciones en un periodo de 44 años comprendido del año 1980 al año 2023 (Figura 2). En el inicio de este periodo se publicaron 2 artículos en el año 1980. En el año 1985 hubo un incremento en el número de publicaciones con un total de 11 artículos. Para el periodo 1986-1988 no hubo publicaciones, teniendo un ligero repunte en el año 1989 con 6 publicaciones.

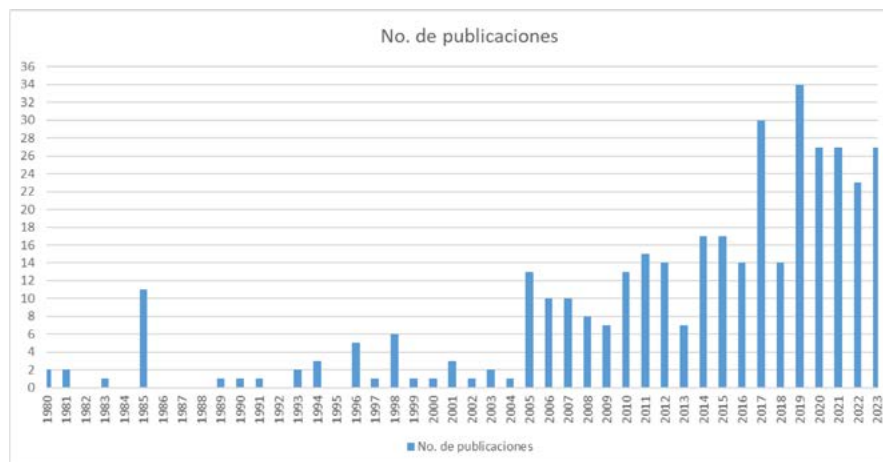


Figura 2. Número de publicaciones del ítem Diseño bioclimático del periodo 1980-2023.

Fuente: elaboración propia.

Volviendo a decaer en el periodo 1999 al 2004. A partir del 2005 al 2016, se incrementaron las publicaciones con un total de 145, promediando 12 artículos por año, teniendo un máximo de 17 artículos en los años 2014 y 2015. En el periodo de los años 2016 al 2023 continúa el incremento de las publicaciones, llegando a un máximo de 34 en el 2019, teniendo un total de 182 publicaciones con un promedio de 26 artículos por año.

En la Figura 3 podemos observar las citas de los 20 autores más citados en el periodo de 1980 a 2023 sobre la temática de diseño bioclimático. En primer lugar, encontramos a Ratti C., Raydan D. y Steemers K., del Departamento de Arquitectura, Centro Martin de Estudios Arquitectónicos y Urbanos, Universidad de Cambridge del Reino Unido, con 273 citas sobre los tópicos Formas arquetípicas, Diseño bioclimático, Clima cálido y árido, Procesamiento de imágenes y Arquitectura vernácula. Con 156 citas se encuentran los autores Vanos J.K., Warland J.S., Gillespie T.J. y Kenny N.A., de la Facultad de Ciencias Ambientales, de la Universidad de Guelph, en Canadá, tocando los temas Diseño bioclimático, Confort humano, Fisiología del ejercicio humano, Salud humana, Microclimatología y Psicología perceptiva.



Figura 3. Número de citas por autor del ítem Diseño bioclimático del periodo 1980-2023.

Fuente: elaboración propia.

En el tercer sitio, con 125 citas, se encuentran los autores Gaitani N., Mihalakakou G. y Santamouris M. del Departamento de Medio Ambiente y Gestión de Recursos Naturales de la Universidad de Ioannina, Grecia; los tópicos desarrollados fueron Principios de la arquitectura bioclimática, Microclima, Espacios al aire libre y Condiciones de confort térmico.

Con 114 citas, en cuarto lugar, se encuentran los autores Bodach S., Lang W. y Hamhaber J. del Instituto de Diseño y Construcción Sostenible y Energéticamente Eficiente, de la Universidad Técnica de Múnich (TUM) y del Instituto de Tecnología y Gestión de Recursos en los Trópicos y Subtrópicos de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Colonia en Alemania; los tópicos desarrollados fueron Diseño bioclimático, Diseño de edificios sensibles al clima, País en desarrollo; Nepal, Técnicas de construcción tradicionales y Arquitectura vernácula. En quinto lugar, están los autores Zhai X.Q., Song Z.P. y Wang R.Z. del Instituto de Refrigeración y Criogenia, Universidad Jiao Tong de Shanghai en China, manejando los temas Configuración integrada, Sistema integrado de energía renovable y chimenea solar, referentes de diseño bioclimático.

Los autores situados en lugares del seis al veinte reportan un máximo de 98 y un mínimo de 42 citas, donde los tópicos diseño bioclimático,

edificios energéticamente eficientes y ahorro de energía son recurrentes, apareciendo la simulación de sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos asociados (simulación CFD) y la simulación térmica de edificios como tema integrante del diseño bioclimático. De igual manera, se observa que la tendencia sobre el tema de diseño bioclimático es latente en todas partes del mundo.

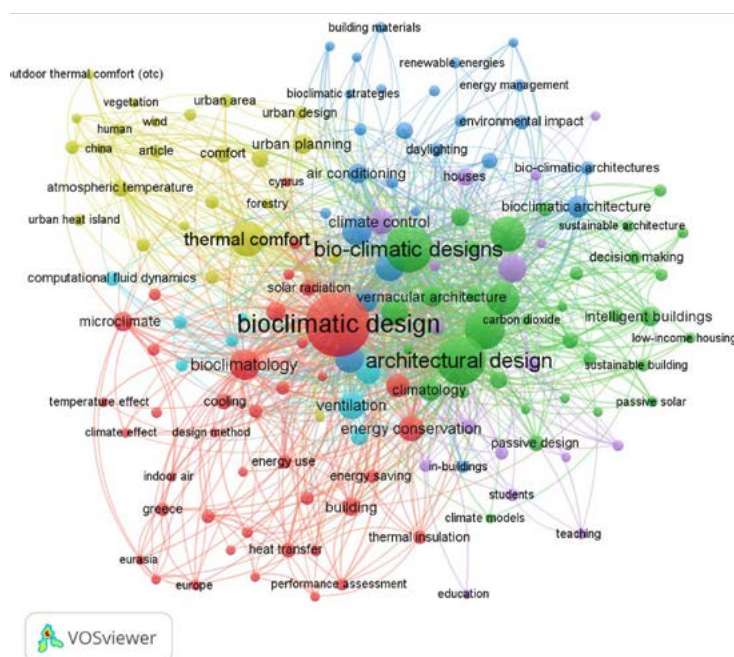


Figura 4. Mapeo de las interrelaciones de ítems con la variable Diseño bioclimático del periodo 1980-2023.

Fuente: elaboración propia.

Utilizando la herramienta VOSviewer, se realizaron los mapeos de las palabras claves de los 372 artículos (Figura 4) y la correlación entre ellas. Se analizaron un total de 151 ítems agrupados en 6 clústeres. En el Clúster 1, con 40 ítems, destacan por recurrencia los ítems Bioclimática, Edificios y energía; el Clúster 2 y sus 35 ítems destacan por la recurrencia de tópicos Diseño, Clima, Rendimiento energético y Diseño pasivo. Los 25 ítems del Clúster 3, la recurrencia se encuentra en los ítems Arquitectura y diseño bioclimático, Edificios y eficiencia energética en

edificios. Los ítems Confort, Temperatura y Urbe son los temas recurrentes en el Clúster 4, compuesto de 25 ítems, en el cual aparece un nuevo término, Simulación. En el Clúster 5, con 17 ítems, se destacan los temas Desempeño ambiental y control del climático; finalmente, el Clúster 6, con 8 ítems, no muestra repetición en los tópicos, destacando el término Fluidos dinámicos computacionales (CFD).

De igual manera, en la Figura 5 observamos las 7899 ligas entre los ítems analizados, en donde el Diseño bioclimático y Diseño arquitectónico muestran la mayor cantidad de ligas en relación al resto de los ítems. Sobre el ítem Diseño bioclimático, las correlaciones fuertes son con los ítems Diseño arquitectónico, Eficiencia energética, utilización de la energía, arquitectura bioclimática, edificios, microclima y sustentabilidad.

Continuando con los análisis, se elaboró el gráfico de la correlación entre los ítems y el periodo temporal de los años 2010 al 2018, donde se localiza la mayor correlación entre ítems (Figura 5). Predominando la relación entre diseño bioclimático y diseño arquitectónico, en dichos clústeres se observa los conceptos, uso de la energía y eficiencia energética como puntos centrales de las ligas. Así mismo, en el clúster de Sustentabilidad, Diseño y Confort térmico destacan las interrelaciones con el clima y sus características. En tanto, el clúster Diseño Arquitectónico y Sustentabilidad comparte los análisis computacionales con el diseño asistido por computadora y fluidos dinámicos computacionales (CFD), respectivamente.

En la Figura 6 observamos cómo, a partir del año 2010, los temas diseño bioclimático, control del clima, climatología, conservación de la energía, confort y diseño pasivo eran las correlaciones recurrentes. Para el año 2014 se encontró una fuerte correlación con el Diseño arquitectónico, la bioclimatología, el confort térmico, la arquitectura vernácula y la arquitectura bioclimática principalmente. Y en año 2018 aparece un nuevo termino Diseños bio-climáticos, pero sin cambiar la fortaleza de las ligas con los ítems de ligas con mayor fortaleza.

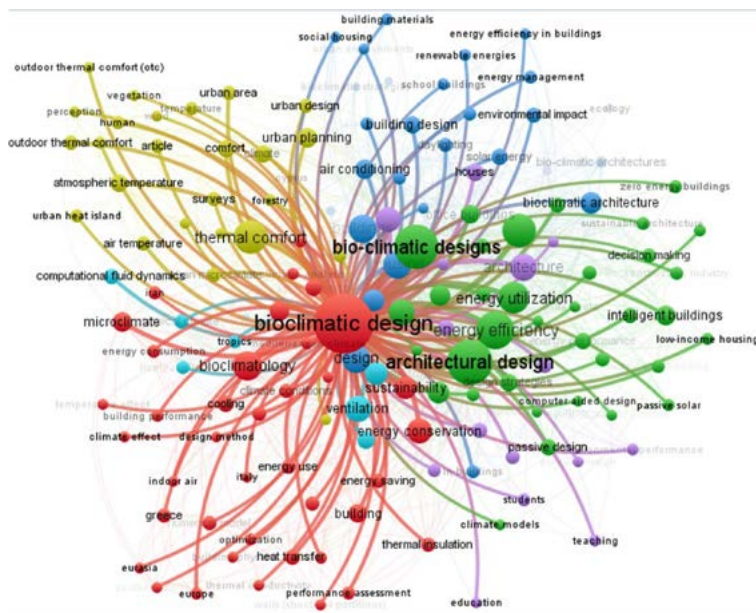


Figura 5. Correlaciones del ítem diseño bioclimático.

Fuente: elaboración propia



Fuente: elaboración propia.

Discusión

Se analizaron 372 artículos en un periodo de 44 años (1980-2023), en el inicio de este periodo se publicaron 2 artículos en el año 1980, aunque Karkanias y Boemi (2010) comenta que concepto aplicado a la arquitectura fue implementado desde el año 1970. Para 1985 hubo un incremento en el número de publicaciones (11 artículos), que corresponde con la adopción del Convenio de Viena en marzo de este mismo año por diferentes países, entre ellos México, cuyo objetivo es de proteger la salud humana y el medioambiente frente a los efectos adversos resultantes de las modificaciones en la capa de ozono (PNUMA, 2019).

En el periodo 1986 -1988 la búsqueda no arroja publicaciones, y para el año 1989 se localizaron 6 publicaciones, a un año de la publicación del Informe Brundtland donde se acuña el concepto de Desarrollo sustentable; decae nuevamente en el periodo 1999 al 2004.

De los años 2005 al 2016 se realizaron un total de 145 publicaciones, con un promedio de 12 artículos por año. Lo cual corresponde a que en este periodo se dieron las principales tendencias hacia el desarrollo sustentable, iniciando en 2005, correspondiente a la entrada en vigor del Protocolo de Kioto sobre la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. En 2006 se realiza el comunicado de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo sobre una estrategia temática para el medioambiente urbano; para el 2008 se realiza el Reporte de Desarrollo Sostenible 2008, en México se presenta el Reporte de Desarrollo Sostenible en función de la agenda de responsabilidad; en 2009, México es el primer país en desarrollo en proponer una meta para reducir sus emisiones de gases. Para el 2012 se lleva a cabo la Cumbre Río, en la que los miembros decidieron poner en marcha un proceso para desarrollar un conjunto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); también se adoptaron directrices innovadoras sobre políticas de economía verde y se puso en marcha una estrategia para financiar el desarrollo sostenible (UN, 2023).

En la Conferencia Mundial de la UNESCO sobre la Educación para el Desarrollo Sustentable (EDS) de 2014, en Aichi-Nagoya, Japón, se lanzó el Programa de Acción Global sobre Educación para el Desarrollo Sustentable, a manera de contribución de la UNESCO a la formulación de la Agenda de Educación Post 2015 y la Agenda de Desarrollo Post 2015 (SER, 2023); eventos que coinciden con los años de mayor número de publicaciones en ese periodo.

En el periodo de los años 2016 al 2023 se encontró un total de 182 publicaciones, este periodo, en el cual se muestra un notable incremento, coincide con la publicación de los Indicadores para la Evaluación del Desempeño Ambiental en el año 2016, para el siguiente año se realiza la Cumbre sobre el Impacto del Desarrollo Sostenible 2017, donde entre sus objetivos principales se encuentra garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos en todas las edades, año en el cual se publican un total de 30 artículos segundo más alto del periodo.

Posteriormente en el 2018 se publica el 8º Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2018, se celebra el Día Mundial del Medio Ambiente 2020 dedicado a la biodiversidad celebrado en Colombia; para el 2021 se crea el Programa de Conservación para el Desarrollo

Sostenible PROCODES 2021 que promueve que los habitantes de las Áreas Naturales Protegidas aprovechen los recursos naturales de forma sustentable (CENAP, 2023). Con respecto a todo lo anterior, se puede determinar que la cantidad de publicaciones están relacionadas con los requerimientos de solución con respecto al cuidado al medioambiente natural y salud de la población mundial, ámbitos donde el diseño bioclimático participa con el cuidado en el uso de recursos y en la generación bienestar de los usuarios de espacios habitables través de medios pasivos de acondicionamiento térmico en edificaciones.

En tanto la variable Diseño bioclimático muestra correlaciones fuertes, señaladas en los mapas, con los ítems Diseño arquitectónico, Eficiencia energética, utilización de la energía, arquitectura bioclimática, Edificios, Microclima y Sustentabilidad; lo que genera un conjunto de conceptos que son participes del diseño de edificaciones sustentables. Finalmente, con respecto a lo cronología de las interrelaciones se observa que ítems como Control solar pasivo, Diseño pasivo se unen a ala variable en años recientes fortaleciendo los conceptos de Ahorro de energía y Arquitectura sustentable.

Conclusiones

Esta investigación genera una visión el estado actual de la producción científica en la línea de investigación del Diseño bioclimático con referencia a las diferentes vertientes del mismo. Lo anterior es útil para poder determinar los enlaces con las diferentes líneas con respecto a la relación entre la bioclimática con el ahorro energético realizado a través de la integración del diseño con su medio y las formas de poder generar soluciones a partir de análisis teóricos y simulaciones computacionales que ayudan a predeterminar el comportamiento de los edificios en su etapa de proyección y otorgar la oportunidad de la toma de decisiones con respecto a su operación, así como también, al confort y salud del usuario.

Referencias

- Abdollah Baghaei Daemei, S., Eghbali, R., & Mehrinejad Khotbehsara, E. (2019). Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. *Journal of Building Engineering*, 25, 100758. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2019.100758>
- Bienvenido H., D., Rubio B., C., Marín G., D., & Canivell Jacinto, C. (2021). Influence of the Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios on the bioclimatic design strategies of the built environment. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103042. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103042>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2021). *Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible (PROCODES) 2021*. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/programa-de-conservacion-para-el-desarrollo-sostenible-procodes-2021> (Consulta: 15 de noviembre de 2023)
- Elshafei, G., Vilcekova, S., Zelenakova, M., & Negm, A. M. (2021). Towards an adaptation of efficient passive design for thermal comfort buildings. *Sustainability*, 13 (17), 9570. <https://doi.org/10.3390/su13179570>
- González S., F., Pulsant T., J. G., Tito G., C., Oliva Prevots, M., & Cintra C., M. (2012). Análisis de algunos indicadores bibliométricos de la Revista de Información Científica de la Universidad Médica de Guantánamo. *Revista Información Científica*, 75 (3), julio-septiembre. Universidad de Ciencias Médicas de Guantánamo.
- Karkanias, C., Boemi, N., Papadopoulos, A., Tsoutsos, T., & Karagianidis, A. (2010). Energy efficiency in the Hellenic building sector: An assessment of the restrictions and perspectives of the market. *Energy Policy*, 38 (5), 2776–2784. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.009>
- Licea de A., J., & Santillán R., E. G. (2002). *Bibliometría ¿para qué?* *Biblioteca Universitaria*, 5 (1), 3–10. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Naciones Unidas. (2012). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible*. 20 a 22 de junio de 2012, Río de Janeiro. <https://www.un.org/es/conferences/environment/rio2012> (Consulta: 15 de noviembre de 2023)

- Ness, B., Andresen, I., & Kleiven, T. (2019). Building bioclimatic design in cold climate office buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 352 (1), 012066. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/352/1/012066>
- Noriega N. de G., C. A., Zambrano F., F. J., Guerrero B., M. A., & Silva S., D. R. (2023). Desempeño organizacional en las empresas: un análisis bibliométrico. *Telos*, 25 (2), 509–522. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99375872020>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2019). *Manual del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono* (1985) (12.^a ed.). Secretaría del Ozono. ISBN: 978-9966-076-69-4
- Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE). (s. f.). *Grandes programas de la UNESCO - Educación*. <https://mision.sre.gob.mx/unesco/index.php/grandes-programas-de-la-unesco/educacion>
- Solano L., E., Castellanos Q., S. J., López R. del R., M. M., & Hernández F., J. I. (2009). La bibliometría: una herramienta eficaz para evaluar la actividad científica postgraduada. *MediSur*, 7 (4), 59–62. Universidad de Ciencias Médicas de Cienfuegos.

Capítulo 8

El enfoque del discurso humanismo mexicano a discusión en la política ambiental y energética de México 2025-2030

Gloria Esther Briceño Alcaraz¹
gloriabri@iteso.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20252021>



¹ Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente ITESO

Resumen

En los últimos años podemos encontrar el uso generalizado del término “humano” o “humanista” en la literatura científica, o bien adaptado a las políticas públicas que lo resaltan como un enfoque que cobra fuerza en la narrativa especializada (Arendt, 2005; Aguilar, 2005; Bauman, 2020). Cabría por lo tanto que preguntarnos si a las políticas públicas ambientales y de energías renovables con las que se enfrenta el cambio climático en nuestro país, se les puede endosar el enfoque “humanista” o “humanismo mexicano” como un distintivo de su marco regulatorio. En este ensayo se discutirá si los discursos políticos de la nueva administración en México se acompañan con las acciones necesarias para avanzar hacia los compromisos del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, para ello, es importante revisar dónde estamos en cuanto al cumplimiento de metas específicas (ODS 7) sobre producción, generación y cobertura de energías en México. Se revisarán las concepciones de “humanismo” y su pertinencia en el marco regulatorio de las políticas públicas para este sector, presentando hacia el final algunos casos exitosos de instituciones de educación superior que están en los primeros rankings mundiales de sustentabilidad y educación ambiental, coadyuvando así a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (ONU, 2015).

Introducción

Para empezar, cabría preguntarnos si a las políticas públicas ambientales y de energías renovables con las que se enfrenta el cambio climático en nuestro país, se les puede endosar el enfoque “humanista” como un distintivo de su marco regulatorio. ¿Es acaso un sinsentido que lo político, lo científico y lo humano se puedan combinar para hacer frente a los desafíos a los que hoy nos enfrentamos como país y humanidad? ¿Qué significado tiene considerar el enfoque humanista como un contenido

más de las políticas ambientales y de transición energética? Estas son algunas preguntas que propongo para desarrollar en este ensayo y que espero generen en quien gentilmente leen esta contribución, inquietudes y aportaciones críticas.

Sería interesante, para iniciar, conocer en qué consisten las propuestas que tienen la Secretaría de Energía (SENER) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en este nuevo gobierno de la Dra. Sheinbaum (2024-2030), para poder responder cómo se integraría realmente el enfoque “humanista” a dichas políticas; saber identificar su discurso y diferenciar su sentido técnico de lo político y así, conocer qué podemos esperar en materia ambiental y de transición energética en los próximos años, porque a partir de ello se podrán desarrollar programas en los campos específicos que nos ocupan y así coadyuvar hacia las metas propuestas en materia energética y de cambio climático.

Para entrar en contexto, recordaremos que desde el 1ro de octubre pasado, al recibir la estafeta de su gobierno, la actual mandataria, Dra. Sheinbaum, enfatizó que continuaría la segunda etapa de la Cuarta Transformación (4T) bajo el lema del humanismo mexicano: “Por el bien de todos, primero los pobres”, con el que su predecesor, el Lic. Andrés Manuel López Obrador (2018-2024) había iniciado la transformación del país. Incluyendo con este mote, por supuesto, al sector energético y ambiental. Con ese hecho político identificamos la inauguración de un nuevo discurso que marca un antes y un después en el país; no lo podemos negar y más vale reconocerlo para poder analizar críticamente el momento actual donde no solo se entrelazan elementos políticos, sino también económicos y sociales de la cultura nacional:

La política de la 4T y del humanismo mexicano tiene el objetivo de mantener la disciplina fiscal y financiera y al mismo tiempo erradicar la corrupción y que esos recursos públicos se distribuyan para beneficio de los que menos tienen. ¿Cómo? A través de programas sociales de bienestar, de educación, salud, vivienda y también en obras públicas, que potencien la economía nacional y sean de beneficio nacional para el país. (Conferencia de prensa matutina, presidenta C. Sheinbaum, 10/01/2025)

Si bien como recordaremos, el tema de la transición y distribución energética bajo la óptica de la “justicia” se había discutido ampliamente en la publicación anterior que dio origen al Klein Alumni Seminar UNIVA-DAAD (2023) “Las energías renovables y la transición energética justa” (2024), no se tematizó este otro componente que hoy —al cambio de administración federal— se integra en la glosa de las políticas ambientales de manera distintiva e importante: el enfoque humanista mexicano. De tal manera que el tema que nos ocupa se ha ampliado y podríamos decir que, no bastaría con que estas sean “justas” sino que además deben concebirse de acuerdo con los principios humanistas según la racionalidad de dichas políticas. ¿Dónde nos encontramos en cuanto a las políticas públicas en este sector?

Si bien, como recordaremos, el tema de la transición y distribución energética bajo la óptica de la “justicia” se había discutido ampliamente en la publicación anterior que dio origen al Klein Alumni Seminar UNIVA-DAAD (2023) “Las energías renovables y la transición energética justa” (2024), no se tematizó este otro componente que hoy, al cambio de administración federal, se integra en la glosa de las políticas ambientales de manera distintiva e importante: el enfoque humanista mexicano. De tal manera que el tema que nos ocupa se ha ampliado y podríamos decir que no bastaría con que estas sean “justas”, sino que además deben concebirse de acuerdo con los principios humanistas según la racionalidad de dichas políticas. ¿Dónde nos encontramos en cuanto a las políticas públicas en este sector?:

...tiene principios muy importantes como la prosperidad compartida y la justicia ambiental para poder realmente incorporar a las comunidades [...] Debemos lograr un cambio profundo en el modelo de desarrollo para poder avanzar hacia la sostenibilidad [...] la política de desarrollo debe tomar al medioambiente no como una externalidad, sino verdaderamente como un componente esencial. (SEMARNAT, Comunicado de prensa núm. 13/24)

Cabría por lo tanto que analizar la noción humanista para identificar si estos enunciados son susceptibles de considerarse como parte de un marco sólido que orienta las políticas públicas de acuerdo con una fun-

damentación no solo ideológica sino técnica, con la finalidad de dar certidumbre a la toma de decisiones ambientales y energéticas que se requieren en México.

Utilizaremos para ello el análisis del discurso que, más que una metodología, representa, como sabemos, una perspectiva de las ciencias sociales encargada de problematizar críticamente las asimetrías sociales que subyacen a distintas formas de poder (en el texto y contexto, inclusive en las plataformas streaming) como mecanismos de dominio de las subjetividades, perpetuadas en las estructuras sociales. Esta perspectiva de análisis crítico tiene su origen en la Escuela de Frankfurt, así como en la lingüística crítica inglesa (Van Dijk, 2015). Dicho lo anterior, se aclara que no es finalidad de esta contribución explicar las bases del movimiento político de la 4T, pero sí hacer referencia al hecho de que estamos ante un discurso que ha venido sustituyendo gradualmente al anterior de corte neoliberal que ha dominado por casi cuarenta años el escenario político de nuestro país y del mundo.

En este breve ensayo se discutirá de manera sucinta dónde estamos en cuanto al cumplimiento de metas específicas (ODS 7) sobre producción, generación y cobertura de energías en México, para de ahí revisar las concepciones de “humanismo” y su pertinencia en el marco regulatorio de las políticas públicas para este sector, presentando hacia el final algunos casos exitosos de instituciones de educación superior que están en los primeros rankings mundiales de sustentabilidad y educación ambiental, coadyuvando así a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (ONU, 2015).

De los discursos a los hechos

Hace ya un lustro que el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo publicó el Informe sobre el Desarrollo Humano 2020 con el subtítulo de La próxima frontera: el Desarrollo Humano y el Antropoceno (PNUD, 30° edición, 2020). En ese compendio de treinta años, fue cuestionada seriamente la utilización del término “crecimiento” como medida de progreso, reconociendo que la huella material y de carbono que afecta directamente al cambio climático ha sido generada por los

países industrializados, es decir, por la mano del hombre y del sistema capitalista extractor por excelencia, por lo que ahora es responsabilidad de todos combatir el flagelo. No es casual que un grupo de científicos haya adoptado el término “Antropoceno” (Crutzen y Stoermer, 2000) para dar a entender que esta es como una nueva era “geológica” en la que la vida del planeta dependerá directamente de las decisiones que tome el hombre como especie; aquí vamos todos, ricos y pobres (PNUD, 2020).

Bajo esa visión de urgencia de cambio de paradigma, se propusieron nuevas formas de desarrollo sustentable para continuar promoviendo las economías sin socavar los recursos de la naturaleza y de las poblaciones vulnerables que menos tienen, las cuales, como sabemos, son las que más sufren los efectos devastadores del cambio climático. Desarrollo sí, pero sostenible que reduzca y mitigue -lo más posible- las diversas presiones sobre el planeta, particularmente las emisiones globales de gases de efecto invernadero generadas por los combustibles fósiles: carbón (45 %), petróleo (32 %) y gas natural (22 %) (IEA, 2022). ¿Es posible alcanzar aún esa meta?

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2015) trazó, como se recuerda, “una nueva senda de desarrollo” y planteó determinados objetivos y metas que han servido como indicadores para medir los avances que han reportado los países en los distintos rubros. Dentro de ellos, se destaca el ODS 7 “Energía asequible y no contaminante”, que contempla garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Este ODS comprende cinco metas muy específicas con las que podemos dar seguimiento a la consecución de las mismas a través de la comparación de la Tabla 1 correspondiente a la línea base de 2015 y la Tabla 2 del avance al 2023 (SDG Tracker, 2023):

Tabla 1. Línea base de 2015 y los avance al 2023

Meta	Indicadores	Estado actual	Línea base 2015
7.1	7.1.1 Acceso a la electricidad	99.4% (+0.4 %) Estancado	99 % de la población total
	7.1.2 Acceso a combustibles limpios	84.9% (+0.35%) Estancado	84.6 % de la población total
7.2	7.2.1 Energía renovable	10.34% (+12.5 %) Avance lento	9.19 % de la generación eléctrica total.
7.3	7.3.1 Eficiencia energética	0.92% kWh/\$ (-7.6 %) Avance lento	0.92 kWh/\$
7a	7a.1 Acceso a inversiones en energía limpia	338.65 millones de USD (+49.6 %) Avance rápido	226.34 millones de USD
7b	7.b.1 Expansión de servicios de energía en países en desarrollo	219.94 W (+54.96 %) Avance rápido	141.93 W por habitante

Comparando a grosso modo estas dos tablas, se observa que hay dos indicadores correspondientes a la meta 7.1: 7.1.1 de acceso a la electricidad y el 7.1.2 de acceso a combustibles limpios, ambos en “estancamiento”; mientras que la meta 7.2 de energía renovable y la 7.3 de eficiencia energética se reportan con un avance lento. Los únicos avances rápidos se localizan en las metas 7.a y 7.b donde se observa una mayor inversión en energías limpias y de expansión de los servicios watt. ¿Que hace que la meta 7.1 siendo tan relevante esté estancada? Para algunos analistas existen básicamente dos razones: una la encontramos en los efectos económicos derivados por la pandemia del COVID-19 y la otra en el poco impulso que recibió la transición energética durante el periodo de gobierno anterior al no haber apostado por un plan de desarrollo ambicioso (Serra, 2024).

Analizando los resultados de los indicadores de las metas 7.1 y 7.2 en estancamiento, nos damos cuenta que corresponden a las comunidades vulnerables que aún siguen rezagadas del acceso eléctrico en nuestro

país, con lo cual podríamos decir que la justicia del humanismo mexicano que reza: “por el bien de todos, primero los pobres”, sigue siendo un ideal a alcanzar, de ahí que se mantenga como principio rector en el marco de las políticas públicas de México. Como corolario de este apartado, añadimos que si comparamos estos avances con lo logrado en otras economías de países de América Latina, veremos que México se encuentra por debajo de Chile, Argentina, Colombia y Brasil (IEA et al. 2022), desventaja que nos coloca como el único país miembro de la Organización de Cooperación Económica para el Desarrollo (OCDE) que aún no consigue la cobertura universal eléctrica.

Este comparativo del ODS 7 nos permite hacer una evaluación del estado de la cuestión con los datos arrojados por el SDG Tracker, donde advertimos resultados poco halagüeños para nuestro país. Algunos especialistas atribuyen estos resultados a que los últimos seis años las políticas públicas en este sector, se perdió una definición clara del rumbo debido a un discurso más político e ideológico que técnico, por ejemplo el Prosener (Programa Sectorial de Energía 2020-2024) redefinió el término como transición energética “soberana” al uso ordenado, sostenible y sustentable de todas las fuentes de energía primarias disponibles, incluyendo las fuentes de energía limpia para alcanzar la “independencia energética de la nación” (Secretaría de Energía, 2022, p. 20). “Soberanía e independencia” fueron términos remarcados a lo largo de ese periodo que como lo muestran los datos, no tuvieron un impacto directo en el acceso a tecnología limpias y a mejorar la eficiencia energética.

No obstante, en lo político y constitucional, se reconoce que se dieron diversas acciones para lograr esa “independencia energética” al volcarse el Estado, de manera prioritaria, a la tarea del rescate y reordenamiento de dos grandes fuentes de energía con que cuenta el país: Sector eléctrico (CFE) y el de hidrocarburos (Pemex), recibiendo este último sector una inversión de 330 mil millones de pesos para la construcción de la refinería Olmeca de Dos Bocas, la cual contribuiría con el 20 % del consumo de la gasolina en el país, pero que a la fecha su funcionamiento ronda el 80 % (Forbes, 2024).

En el Prosener de ese periodo se incluyeron seis objetivos principales, de los cuales dos tenían que ver con la transición energética, el n.º

3: Organizar las actividades científicas, tecnológicas e industriales que sean necesarias para la transición energética de México a lo largo del siglo XXI y el no. 4: Elevar el nivel de eficiencia y sustentabilidad en la producción y uso de las energías en el territorio nacional. Los cuales, según las metas 7.2 y 7.3 (ver tabla 2), registraron un lento avance. Es importante, por lo tanto, dar seguimiento a estos objetivos y metas para ver si son retomados en el Plan Nacional de Desarrollo 2025-2030 en consulta (actualmente se encuentra abierta la convocatoria para la participación en las mesas de trabajo a nivel nacional en la web <https://planeandojuntos.gob.mx/>).

La nueva titular de la SENER, la Dra. Luz Elena González Escobar, anticipó en noviembre pasado, aunque de manera breve, en qué consistiría la Estrategia del Sector Eléctrico y señaló cuatro ejes prioritarios: 1. Fortalecimiento de la planeación del Sector Eléctrico Nacional, 2. Justicia energética, 3. Sistema eléctrico robusto, confiable y seguro, englobando 3.1 Diagnóstico del Sistema Eléctrico, 3.2. Estrategias para garantizar la confiabilidad del sistema, 3.3 Pronósticos para la transición energética y 4. Reglas claras para asegurar e incrementar la inversión privada. De estos, los ejes 2 y 3.3 son en los que podríamos encontrar reflejadas con más claridad las medidas y acciones para la transición energética. Esperamos, por lo tanto, que en los próximos meses, ya analizados los resultados de las mesas de trabajo de la Convocatoria, la SENER esté en condiciones de presentar el marco legal de Energía con Desarrollo Sustentable, y así vislumbrar mejor la dirección hacia la consecución de las metas del ODS 7 de la Agenda 2030.

A continuación, se exponen sucintamente las acepciones del término humanista/humano/humanismo desde el punto de vista histórico y teórico, así como su desplazamiento a las ciencias sociales y políticas públicas.

El humanismo como nuevo discurso político

En los últimos años podemos encontrar el uso generalizado del término “humano” o “humanista” en la literatura científica, o bien adaptado a las políticas públicas que lo resaltan como un enfoque que cobra fuerza en la narrativa especializada (Arendt, 2005; Aguilar, 2005; Bauman, 2020).

Habría que decir para empezar y de manera muy resumida, que el término humanismo es polisémico ya que su raíz latina *humanus* ha tenido básicamente tres significados distintos: a) como equivalente a la naturaleza humana, b) sea para resaltar las cualidades de benevolencia y compasión y c) para indicar a una persona culta y virtuosa, dependiendo de las diversas tradiciones y épocas históricas. Por ejemplo, desde que F.J. Niethammer acuñó dicho término en 1808, se le empleó para designar a los *studia humanitatis* que englobaban las lenguas clásicas (latín y griego) así como otras manifestaciones de la cultura (historia, poesía, literatura y filosofía), distinción que permeó los estudios de las universidades europeas y americanas (Rodríguez, 2008, p. 92).

Si bien en sus orígenes el humanismo estuvo impregnado de una cosmovisión helenística y romana que aspiraba al logro de las más altas virtudes humanas, después, con la influencia de la tradición escolástica y cristiana, se transformó en un compendio de cualidades religiosas que tenían que ver con la benevolencia y compasión. Posteriormente, en los siglos XIV y XVI, con el movimiento renacentista italiano, se reconfiguró el término, dotándolo de una racionalidad estética y sensual del cuerpo humano plasmado en las bellas pinturas neoplatónicas botticellianas, con las cuales se rescataron a las diosas mitológicas griegas del olvido; por suerte, el autor de estas obras: Botticelli esquivó la hoguera, al contrario de algunos personajes de su tiempo. Gracias a ese feliz hecho, hoy día podemos disfrutar en la Galería de los Uffizi en Florencia de sus excelentes obras, tales como “El nacimiento de Venus” o bien “La Primavera”.

Entre los siglos XVIII y XIX surgió el racionalismo ilustrado europeo que pugnó por la supremacía de la razón: *Cogito ergo sum* (pienso luego existo) sobre la naturaleza y otras virtudes del hombre. Sin embargo y casi simultáneamente, aparecerá un amplio movimiento cultural y literario en Alemania y Reino Unido que va a anteponer el sentimiento romántico y estético del hombre a la razón cartesiana, quizá uno de los autores más representativos de ese movimiento fue el genio de las letras alemanas J.W. von Goethe (1749-1832), basta con leer su novela “Las desventuras del joven Werther” para aún en nuestros días, emocionarnos y comprender la gran influencia que tuvo en su época esa novela del género *Bildungsroman*. Habría que añadir que gracias a esa influencia

del clasicismo alemán y del movimiento romántico, se instaurará en esos siglos una cultural neohumanista que contribuyó a forjar un ideal del ser humano expresado en la Paideia (el arte de formar y educar a un niño); en ese rico contexto sociocultural podemos ubicar la obra fecunda de los hermanos Wilhelm y Alexander von Humboldt (1769-1859).

Ese ideal humanista cabe decir, permea aún en los valores formativos y de ciertos programas educativos en la actualidad, como lo concibe el filósofo Savater:

Educar es creer en la perfectibilidad humana, en la capacidad innata de aprender y en el deseo de saber que la anima, en que hay cosas (símbolos, técnicas, valores, memorias, hechos...) que pueden ser sabidos y merecen serlo, en que los hombres podemos mejorarnos unos a otros por medio del conocimiento. (Savater, 2004, p.18)

En este breve recorrido histórico podemos constatar la ductilidad y polifonía del término Humanismo el cual no queda constreñido como vimos, a un solo campo del saber humano y científico, sino que podemos concebirlo como un potente descriptor del conocimiento transdisciplinar del que las ciencias sociales y humanidades.

El término, sin embargo, incluye el calificativo de “mexicano” que nos remite a un espacio simbólico del nacionalismo mexicano en construcción o como el historiador Lorenzo Meyer lo expresa, a un “sueño utópico en construcción” (REC XXXVI, 2025). En todo caso, el término intenta amalgamar por una parte, la herencia polifónica centrada en valores éticos occidentales antes descritos y por el otro lado, las contribuciones de algunos frailes humanistas que llegaron a la llamada “Nueva España” tras la conquista como Fray Julián Garcés, Don Vasco de Quiroga, Fray Bartolomé de las Casas y Fray Juan de Zumárraga, que abogaron por un trato justo y humano a los indígenas reconociendo en ellos las cualidades humanas que habría sin embargo, que cultivar a través de la evangelización (Méndez Plancarte, 1945). En esta tradición mexicana podemos también citar uno de los documentos políticos más importantes de México “Los sentimientos de la nación” cuya autoría es del líder insurgente José María Morelos y Pavón y que fue presentado en el Congreso de Anáhuac en 1831. En él se asientan los principios

humanos imperecederos que postulan la abolición de la esclavitud, la igualdad de derechos para todos los ciudadanos, sin importar su origen étnico y la separación de los poderes para prevenir abusos de la autoridad: “...la buena ley es superior a toda persona y debe ser tal que modere las desigualdades sociales, mejore las costumbres y obligue al patriotismo, para que no distinga a un hombre a otro más que la virtud, nunca el color de la piel” (Galeana, 2013, p. 18).

Aplicaciones del enfoque humanista como un bien público y del buen vivir

Si partimos de que la educación, la cultura y los recursos naturales son un bien público al que todos tenemos derecho de acceder como seres humanos, nuestra misión sería entonces formar ciudadanos responsables, con consciencia crítica, capacidad comunicativa y empatía para que aprendan a convivir en armonía, solidariamente y con respeto a la naturaleza, bajo el principio de la ética ecosocial o lo que algunos denominan también del buen vivir (Acosta, 2015; Gutiérrez, 2019; Briceño, 2024). La ética ecosocial en el fondo es una forma amplia y holística de humanismo que reconoce el valor intrínseco de todo ser vivo y sitúa la trama de la vida como máximo valor y centro de toda reflexión y acción, para Morin (1996) este es el principio “holístico” por el que las partes están unidas en un todo y el todo está en todas partes.

Si esta premisa de la ética ecosocial la aplicamos a las políticas públicas incluyendo las ambientales y de energía entonces deberíamos generar acciones que nos comprometan a buscar el bien común o el buen vivir con base en la justicia social más allá de la orientación política, de clase social o económica, que más que un concepto es un movimiento de los pueblos ancestrales por la propia búsqueda de formas alternativas y humanas de vivir y convivir con los recursos de sus entornos naturales y tradiciones (Acosta, 2015). Como lo expresó Arendt (2005) la vida humana es *vita activa* y cumple su sentido al compartirse con los otros seres humanos, porque en el fondo nos compromete a hacer algo por los demás y por la comunidad.

Pues bien, ese buen vivir que implica la ética ecosocial lo podemos encontrar como marco inspirador en las políticas educativas de varios

centros e instituciones de estudio que han desarrollado programas para investigar y formar recursos humanos especializados, con el fin de contribuir a la sustentabilidad del ecosistema social y natural. Para ver de más cerca la aplicación del enfoque de ética ecosocial en el contexto de las políticas públicas ambientales y energéticas en los espacios universitarios de nuestro país, comparto los casos de cinco universidades que de acuerdo con el UI GreenMetric World University Rankings 2024 están mejor posicionadas por sus esfuerzos en crear condiciones de funcionamiento dentro de los estándares de sustentabilidad en el mundo.

Tabla 3. *Ranking de Instituciones de educación superior en México.*

Fuente: Overall Rankings <https://greenmetric.ui.ac.id/rankings/overall-rankings-2024>

World Rank	Contry Rank	Universidad	Total Score
16	1	Universidad Autónoma de N. L.	9125
37	2	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	8800
79	3	Universidad Nacional Autónoma de México	8600
109	4	ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara	8435
157	5	Universidad Autónoma de Yucatán	8225

En este ranking participaron 1477 instituciones de educación superior en el mundo, la selección se efectuó considerando las medidas concretas que aplican las instituciones para enfrentar los efectos negativos del cambio climático, tales como: el tratamiento de residuos así como el manejo responsable de la energía limpias, áreas verdes, proyectos de investigación y formación humana con ética ecosocial. En nuestro país solo están registradas 32 Instituciones de educación superior con diferentes rankings (del 16 al 1462), dentro de las cuales destacan las cinco siguientes (tabla 3):

Rank 1: La Universidad Autónoma de N. L. refrenda su liderazgo por ocho años consecutivos en sustentabilidad manteniéndose en el lugar no. 16 a nivel internacional, en el 2do lugar en América Latina y el 1ro a

nivel nacional. Su preocupación y compromiso con la sociedad mexicana e internacionalmente es cumplir con los ODS en materia de energía y desarrollo sostenible de la Agenda 2030. Para ello ha desarrollado una cultura ambiental de cuidado a la biodiversidad entre sus estudiantes, profesores y personal administrativo, implementando programas de educación ambiental, foros de discusión sobre el cambio climático y diversos proyectos de investigación aplicada tendientes a resolver los problemas ambientales globales.

Rank 2: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; entre sus aportes a la ecología sustentable la distingue el Jardín Botánico Universitario, único en el país, que cuenta con diez secciones de plantas y un herbario en donde se realizan diversas investigaciones. Su objetivo es el fomento y creación de proyectos de investigación para la generación de conocimiento básico y aplicado a través de la formación de recursos humanos especializados. Algunas líneas de investigación son: Ecología y cambio climático, cultivo de tejidos y micropropagación, ecofisiología vegetal, bioquímica y biología molecular y síntesis de productos químicos.

Rank 3: Universidad Nacional Autónoma de México, cuenta con el Instituto de Energías Renovables (IER), que mantiene un indiscutible liderazgo nacional e internacional en energías renovables a través de sus múltiples líneas de investigación científica y aplicada. La finalidad del IER es generar conocimiento de vanguardia y de frontera que contribuya al desarrollo sustentable del país, particularmente en áreas de investigación como la solar, eólica, geotermia, bioenergía, eficiencia energética y sustentabilidad, así como en energía, agua y alimentos. Cada una cuenta con equipos multidisciplinarios y laboratorios de alta gama donde se reproducen —como en el caso de la energía eólica— modelos meteorológicos para el análisis de aprovechamientos de esa energía, tanto en territorio como en el mar.

Rank 4: ITESO. Universidad Jesuita de Guadalajara, es la universidad privada más sustentable de México, ya que es la líder en el tratamiento de residuos como de la energía y acciones tendientes a disminuir el cambio climático. Destaca en investigación especializada del tratamiento del agua, como el proyecto de modelación hidrogeológica y ambiental de una microcuenca en la ZMG, con el cual se monitorean las lluvias,

escurrimientos y niveles de agua subterránea para el aprovechamiento del agua de lluvia para uso humano. En materia de residuos se tienen dos proyectos importantes, como el biorreactor para residuos orgánicos y el programa para reducción de residuos. En el apartado de sistemas energéticos se tienen proyectos de aplicación profesional (PAP) relacionados con administración de energía en microrredes con fuentes renovables y el de películas antirreflejantes de dióxido de silicio y alúmina para celdas solares a base de silicio. Cuenta además con un seminario permanente de estudios de movilidad urbana sustentable y un laboratorio de movilidad urbana que incluyen estancias de investigación en Lyon (Francia) y Granada (España) y el propio Campus del ITESO para la comparación de modos de implementación de vehículos autónomos.

Rank 5: Universidad Autónoma de Yucatán, cuenta con un Centro de Investigaciones Regionales Dr. Hideyo Noguchi que es líder de investigaciones científicas en áreas de conocimiento social, cultural, médico social y biomédico, cuyo compromiso es el bienestar de la sociedad y el medioambiente. Destacando, entre otras, la línea de investigación en ecología y epidemiología de los ciclos de transmisión de patógenos zoonóticos en la península de Yucatán, en la que es especialista en el país y fuera del mismo.

Conclusiones

En esta contribución se dio seguimiento a la transformación del discurso de las políticas ambientales y energéticas en México a partir del enfoque del “humanismo mexicano” como piedra angular del marco político del actual gobierno, iniciado desde el sexenio anterior. Si bien, vemos una continuidad en el discurso que hace hincapié en el bienestar con justicia social y distributiva de los recursos del país, faltan aún las estrategias y acciones alineadas entre las distintas instancia y secretaría que coordinen y aseguren la aplicación de las políticas ambientales y de transición energética para los próximos años.

En esta contribución se dio seguimiento a la transformación del discurso de las políticas ambientales y energéticas en México a partir del enfoque del “humanismo mexicano” como piedra angular del marco

político del actual gobierno, iniciado desde el sexenio anterior. Si bien vemos una continuidad en el discurso que hace hincapié en el bienestar con justicia social y distributiva de los recursos del país, faltan aún las estrategias y acciones alineadas entre las distintas instancias y secretarías que coordinen y aseguren la aplicación de las políticas ambientales y de transición energética para los próximos años.

El discurso político de esta administración del “2do piso” de la 4T se percibe, en todo caso, de mayor apertura, coordinación y equilibrio entre la participación de los diversos actores del sector público y privado para llevar a cabo los cambios en el sector energético y ambiental. En este último sector, por ejemplo, una de las primeras acciones que hizo la Presidencia fue presentar el Plan Nacional Hídrico, que concibe al agua como un derecho humano y un bien de la nación, el cual contempla el reordenamiento de concesiones, tecnificación de riego, 16 proyectos de infraestructura y el saneamiento de los ríos Lerma-Santiago, Atoyac y Tula (Comunicado Presidencia de la República, 2024). Esto denota indudablemente un cambio propositivo en el poder Ejecutivo que reconoce que los discursos son útiles cuando van acompañados con las prácticas y acciones correspondientes.

Por último, en el sector de las instituciones de educación superior en México tenemos evidencias de que la investigación básica y aplicada en materia de energía y medioambiente sostenible es una realidad y que está en pleno desarrollo como campo formativo. Tanto así que los proyectos que en distintos campus universitarios se realizan están siendo reconocidos dentro y fuera del país por su innovación que genera conocimiento de frontera en las ciencias para beneficio de la sociedad mexicana.

Referencias

- Acosta, A. (2015). El Buen Vivir como alternativa al desarrollo. Algunas reflexiones económicas y no tan económicas. *Política y Sociedad*, 52 (2), pp. 299-330.
- Arendt, H. (2005). *La condición humana*. Paidós, Surcos 15.
- Aguilar, L. A. (Coord.) (2005). *Lo humano en riesgo. La educación frente a la globalización*. ITESO, Universidad Panamericana, Goethe-Institut Guadalajara.

- Bauman, Z. (2020). La globalización. *Consecuencias Humanas*. Fondo de Cultura Económica.
- Briceño, G. (2024). La educación sostenible para la transición energética y tecnológica desde el enfoque de la justicia social. En F. Navarrete (Coord.) *Las energías renovables y la transición energética justa*. UNIVA, COECYTJAL, Innovación, Ciencia y Tecnología, Gobierno del Estado de Jalisco, pp.155-172.
- Crutzen, J.P. y Stoermer, E.F. (2000). The “Anthropocene”. *Global Change Newsletter*, 41:17-18.
- Forbes Staff (2024). Recuperado el 10 de enero 2025 <https://forbes.com.mx/refineria-dos-bocas-aun-no-opera-al-100-de-su-capacidad-reconoce-sheinbaum/>
- Galeana, P. (Coord.) (2013). *Los sentimientos de la Nación de José María Morelos. Antología Documental*. Instituto Nacional de Estudios Históricos de las Revoluciones de México INEHRM, SEP.
- Gutiérrez Bastida, J.M. (2019). Antropoceno: tiempo para la ética ecosocial y la educación ecociudadana. *RES, Revista de Educación Social* 28, Enero-Junio.
- Gobierno de México (2024). *Plan Nacional Hídrico*. Recuperado el 13 de enero de 2025 <https://www.gob.mx/presidencia/prensa/presidenta-claudia-sheinbaum-presenta-plan-nacional-hidrico-que-concibe-al-agua-como-un-derecho-y-un-bien-de-la-nacion>
- IEA. (2022). *Greenhouse Gas Emissions from Energy*. International Energy Agency. Energy Data Explorer.
- Méndez Plancarte, G. (1945). Los fundadores del humanismo mexicano. *Thesaurus Tomo 1. Num. 2*. Centro Virtual Cervantes. Recuperado 13 de enero de 2025 https://cvc.cervantes.es/lengua/thesaurus/pdf/01/th_01_002_038_0.pdf
- Morin, E. (2015). *Enseñar a vivir. Manifiesto para cambiar la educación del futuro*. Paidós.
- Morin, E. (1996). *El pensamiento ecologizado*. *Gazeta de Antropología*, 12, 12-16.
- Navarrete, F. (Coord.) (2024). *Las energías renovables y la transición energética justa*. UNIVA, COECYTJAL, Innovación, Ciencia y Tecnología, Gobierno del Estado de Jalisco.

- Our World in Data team (2023). “Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all” *Published online at OurWorldinData.org*. Retrieved from: ‘<https://ourworldindata.org/sdgs/affordable-clean-energy>’ [Online Resource]
- Our World in Data team (2023). “SDG Tracker: Measuring progress towards the Sustainable Development Goals” *Published online at OurWorldinData.org*. Retrieved from: ‘<https://ourworldindata.org/sdgs>’ [Online Resource]
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2020). *La próxima frontera. El desarrollo humano y el Antropoceno*. PNUD.
- Reunión de Titulares y Embajadas y Consulados REC XXXVI (2025). *Conferencia de Lorenzo Meyer: “El humanismo mexicano de la 4T: Un sueño utópico en construcción”*. Plataforma 4T México. Recuperado el 13 de enero de 2025 <https://www.youtube.com/watch?v=W0xO5P-tfHF4&t=1226s>
- Rodríguez Albarracín, E., (2008). ¿Qué es el humanismo? Problemática de la formación humanística. Análisis. *Revista Colombiana de Humanidades*, (72), 89-104.
- Savater, F. (2004). *El valor de educar*. Ariel.
- SEMARNAT (2024). *Secretaria Alicia Bárcena anuncia que México fortalecerá su política climática*. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/secretaria-alicia-barcena-anuncia-que-mexico-fortalecera-su-politica-climatica?idiom=es>
- Secretaría de Energía SENER (2022). *Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional 2022-2036, México, Centro Nacional de Control de Energía*.
- UI Green Metric (2024). *World University Ranking*. Recuperado el 11 de enero 2025 <https://greenmetric.ui.ac.id/rankings/overall-rankings-2024>
- Van-Dijk, T. (2015). “Critical Discourse Analysis”. En Tannen, D., Hamilton, H. y Schiffrin, *The Handbook of Discourse Analysis* (2nd Ed.). Chichester: John Wiley & Sons. 466-485.

Concentradores solares luminiscentes. Prospectiva en el sector energético a corto, mediano y largo plazo

Víctor Hugo Romero Arellano¹

hugo.romero@academicos.udg.mx

José Miguel Blancas Flores¹

jose.blancas@academicos.udg.mx

Mackenson Polché¹

polchemackenson@yahoo.com.mx

Belkis Sulbarán Rangel¹

Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx

Carlos Alberto Guzmán González¹

alberto.guzman@academicos.udg.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20252038>



¹ Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara

Resumen

El crecimiento horizontal de las grandes ciudades, ha provocado enormes distancias de traslado, lo que representa una inversión de tiempo tanto para los pobladores, como para la industria y el comercio. Actualmente, muchas ciudades están optando por un crecimiento vertical, esto ha provocado un aumento en la densidad poblacional y a su vez una gran demanda energética. Para atender esta demanda de energía de forma sustentable, se ha optado principalmente por el aprovechamiento de energía solar a través de paneles fotovoltaicos, sin embargo, recientemente ha llamado la atención otro tipo de sistemas entre ellos los Concentradores Solares Luminiscentes (CSL), que a diferencia de los paneles solares, prometen una mayor estética, ya que estos pueden ser diseñados como ventanales en fachadas, y a su vez tener una eficiencia de conversión viable para considerar a los CSL como una tecnología con gran potencial en el aprovechamiento de energía renovable. En este documento se discute Las perspectivas de esta tecnología, así como las dificultades que se tienen que resolver para consolidar a los CSL.

Introducción

Debido a la expansión demográfica, así como el creciente aumento de la tecnología de dispositivos electrónicos, la demanda energética a nivel mundial presenta una tasa de crecimiento acelerada. Para cubrir esta demanda energética, distintos países están migrando a la generación de energía sustentable, como la energía solar, energía eólica, entre otras (Enerdata, 2024), (Arias, 2022).

En fechas recientes, se ha ido popularizando la instalación de paneles solares en casa habitación; aunque depende mucho de la ubicación geográfica, estos paneles solares pueden cubrir la demanda energética de una casa habitación tradicional ocupada por una familia, donde la instalación de los paneles solares suele ocupar el área de la azotea. Sin

embargo, para una edificación vertical (edificios), la azotea puede ser un espacio insuficiente para la instalación necesaria de paneles que cubran el total de la demanda energética del edificio (ver Figura. 1a).

En un contexto global de transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, los Concentradores Solares Luminiscentes (CSL) han emergido como una tecnología prometedora para aprovechar la energía solar de manera más eficiente y versátil. Estos dispositivos consisten en ventanas de vidrio a las que se les añade materiales luminiscentes, típicamente mediante la adhesión de una película compuesta. Al momento en que la hoja de vidrio recolecta la luz solar o ambiental, las partículas luminiscentes absorberán una parte de la región solar, seguido de la emisión de fotones a longitudes de onda más largas. Estos fotones son confinados dentro del panel a través de reflexiones internas y guiados hacia los bordes, donde se ubican las celdas solares convencionales (ver Figura 1b). La ventaja principal de los CSL es que pueden concentrar la luz solar en un área pequeña, reduciendo la cantidad de material fotovoltaico necesario y, a su vez, pueden transmitir la porción de luz que no ha sido aprovechada para iluminar la habitación con luz natural, tal como lo haría una ventana tradicional (Richards, 2023). Este enfoque puede integrarse de manera ideal en elementos arquitectónicos como ventanas y fachadas de edificios, lo que tiene implicaciones directas para el creciente sector de la construcción de edificios a nivel mundial y la expansión de la industria del vidrio plano para ventanas.

Además, los CSL pueden funcionar incluso en condiciones de baja luminosidad, como días nublados o en áreas urbanas con sombras, lo que les da una ventaja sobre los paneles solares tradicionales. Estas propiedades los hacen especialmente atractivos para aplicaciones arquitectónicas, donde la integración de tecnologías solares no invasivas es una prioridad.

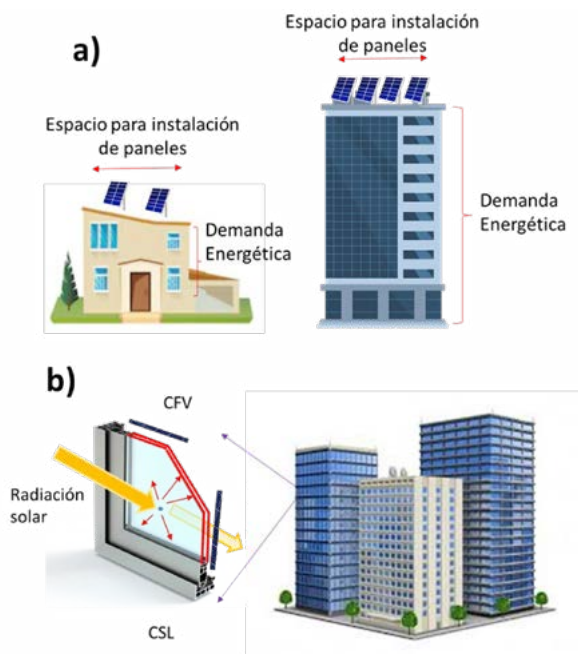


Figura 1. a) Relación de la demanda energética y espacio disponible para instalación de paneles solares. b) Concepto de un Concentrador Solar Luminiscente

Antecedentes

La industria de la construcción está experimentando un cambio significativo hacia la sostenibilidad, impulsado por regulaciones más estrictas, incentivos para la eficiencia energética y la demanda de los consumidores por edificios más verdes y autosuficientes. Los CSL pueden desempeñar un papel crucial en este escenario, permitiendo que los edificios generen su propia energía de manera eficiente al mismo tiempo que mantienen su estética. Integrados en ventanas, fachadas o incluso techos, los CSL permiten a los edificios no solo recolectar energía, sino también reducir el consumo de electricidad al aprovechar la luz natural de manera más eficiente (Richards, 2023).

En mercados emergentes y países en desarrollo, donde el crecimiento de la construcción es más rápido, los CSL podrían ofrecer una solución

accesible para promover la energía renovable. En áreas urbanas densamente pobladas, los CSL en ventanas permiten aprovechar la luz solar sin ocupar espacio adicional, una ventaja significativa en comparación con los paneles solares tradicionales que requieren superficies de techo o largas extensiones de terreno.

A medida que la industria de la construcción se mueve hacia el diseño de edificios de energía neta cero, donde el balance energético anual es neutral, los CSL tienen el potencial de ser una tecnología clave. Esto es particularmente relevante dado que las ventanas y las fachadas de vidrio son cada vez más comunes en los edificios modernos, y los CSL pueden integrarse de manera no invasiva en estos diseños arquitectónicos.

El crecimiento de la industria del vidrio plano está estrechamente vinculado al auge de la construcción de edificios, especialmente en sectores comerciales y residenciales de gran altura. Según varios informes de mercado, la demanda mundial de vidrio plano está en auge debido al aumento de la urbanización, el crecimiento demográfico y la necesidad de infraestructuras más eficientes en términos energéticos (Savaète, 2021). En este contexto, la integración de los CSL en las ventanas ofrece una oportunidad significativa para que la industria del vidrio agregue valor a sus productos. Al permitir que las ventanas actúen como colectores solares mientras conservan sus propiedades ópticas, los CSL no solo mejoran la eficiencia energética de los edificios, sino que también mantienen la transparencia y estética deseada por arquitectos y diseñadores. Esta capacidad de integración en ventanas y fachadas de vidrio puede aumentar aún más la demanda de productos de vidrio especializados, lo que impulsa la innovación en la industria del vidrio plano.

A pesar de las promesas que ofrecen los CSL, aún existen desafíos tecnológicos y económicos que deben abordarse para una adopción masiva. La eficiencia de conversión de energía de los CSL sigue siendo inferior a la de los paneles solares tradicionales, aunque la integración en ventanas y fachadas proporciona beneficios adicionales en cuanto a diseño y funcionalidad. A largo plazo, la investigación en materiales luminiscentes, el desarrollo de procesos de fabricación más rentables y la mejora de la durabilidad de los CSL son áreas críticas para la evolución de esta tecnología (Richards, 2023) (Debije, 2012).

Metodología

Las investigaciones en torno a los CSL han permitido un gran avance de esta tecnología, sin embargo, aún sigue siendo considerada una tecnología emergente, por lo cual, la prospectiva no puede medirse en términos de datos comerciales. Con el fin de cuantificar el crecimiento de esta tecnología, se presenta un análisis estadístico de publicaciones científicas sobre CSL, donde la fuente de información, se tomó el motor de búsqueda “Google Scholar”. Posteriormente, se realiza una correlación con la proyección de crecimiento de la industria de la construcción y el mercado del vidrio plano.

Tendencia de crecimiento de investigaciones sobre CSL

Entre las distintas publicaciones científicas referentes a los concentradores solares luminiscentes, podríamos englobarlas en 3 temáticas principales; i) exploración de materiales, ii) diseños o configuraciones, y iii) modelado matemático. La primera de ellas (exploración de materiales), está centrada en distintos materiales luminiscentes, pero también se discute la matriz que los soporta, siendo predominantes matrices poliméricas entre ellas Acetato de polivinilo (PVA), Polivinilpirrolidona (PVP), Polidimetilsiloxano (PDMS), Polimetilmetacrilato (PMMA) entre otras, todas ellas destacan su alta transmitancia de la región del espectro solar (Griffini, 2019), mientras que los materiales luminiscentes más reportados están centrados en luminóforos, tintas orgánicas, nanocristales dopados con tierras raras, y puntos cuánticos (Moraitis, 2018). En cuanto a la segunda temática (Diseños y Configuraciones), está centrada principalmente en el arreglo o distribución de los materiales que componen el sistema, como por ejemplo de capa o película simple, o configuraciones de doble o múltiple película entre otro tipo de configuraciones (Rafiee, 2019). La tercera temática (modelado), centrada en los modelos matemáticos que describen los fenómenos físicos de acuerdo a cada configuración (Kaysir, 2016), pero también destacan los modelos predictivos, como por ejemplo Ferreira et al. (Ferreira, 2024), quien utiliza algoritmos de aprendizaje automático, para predecir eficiencias de los procesos ópticos, así como

(André, 2024) o P.S. André, quien hace su parte mediante redes neuronales artificiales. Para englobar todas las temáticas antes señaladas, se utilizó como palabras clave de búsqueda el texto: “Luminiscent Solar Concentrator”, El periodo de revisión reportado en este documento es del año 2000 a noviembre del 2024. En la Figura 2. Se muestra el valor arrojado por el buscador, cabe mencionar que dicho valor no necesariamente corresponde a número de publicaciones, sino al número de coincidencias al criterio de búsqueda, sin embargo, refleja el crecimiento de interés de este tipo de tecnología.

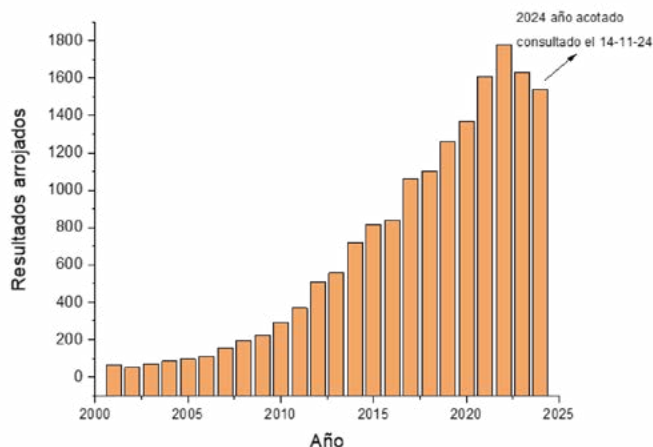


Figura 2. Coincidencias al criterio de búsqueda del texto: “Luminiscent Solar Concentrator” en “Google Scholar”, consultado el 14-de noviembre del 2024

Tal como se puede apreciar la Figura 2, a partir del año inicial de la estadística (2000) y durante los primeros 6 años, el número de resultados arrojados es inferior a 100 teniendo un crecimiento muy lento o casi nulo, esto se debe a las bajas eficiencias de los materiales luminiscentes que prevalecía en esas fechas, lo cual no eran muy esperanzadoras, sin embargo con la consolidación de diversos nanomateriales luminiscentes, entre ellos los puntos cuánticos contribuyeron a la mejora de estos sistemas y por lo tanto el número de publicaciones aumentó considerablemente, tal como se puede apreciar que a partir del año alrededor del 2010 el

número de coincidencias arrojadas fue de 292 y para el año 2022 alcanza el valor arrojado de 1780, es decir un incremento alrededor del 600%, lo que corrobora el interés de estos sistemas como un dispositivo con gran potencial para el aprovechamiento de energía renovables.

Tendencia de crecimiento de la industria de la construcción

Por naturaleza, los seres humanos tendemos a agruparnos, cohabitar y transformar espacios para satisfacer nuestras necesidades como la alimentación, vivienda, salud, entretenimiento, etc. Este esquema de sociedad ha dado origen a las grandes ciudades donde se concentra la mayor parte de la actividad económica. Hace algunas décadas, el crecimiento de la población demandó espacios nuevos que fueron satisfechos con el crecimiento horizontal de las ciudades; sin embargo, esto trajo algunas consecuencias debido a las largas distancias que se generaron con la extensión de las ciudades, por lo cual actualmente el alza de la tasa de crecimiento de la población ha provocado que ahora la expansión de las ciudades sea de forma vertical, es decir, la construcción de casas donde habita solo una familia ha dejado de ser atractiva para dar paso a la construcción de edificios que albergan a decenas o cientos de familias, así como oficinas y comercios.

Algunos datos estadísticos del sector de la construcción se presentan en la tabla. 1. Una gran cantidad de países presentan una tendencia de crecimiento del sector de la construcción; esto se refleja con un valor pronosticado para el 2024 de 3.5 % de crecimiento para el sector de la construcción en general, aunque esto incluye obra civil, edificación, trabajos especializados, entre otros. En la misma tabla se puede apreciar que para el subsector residencial se sigue la misma tendencia de crecimiento con un valor de 4.8 % y edificación no residencial (oficinas, comercio, etc.) de 3.7 %. Por otra parte, en México la tendencia también ha mantenido un crecimiento en los últimos años. Y para este año 2024, fue pronosticado un crecimiento de 4.1 % en el subsector de la edificación. (Atradius, 2023), (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2024).

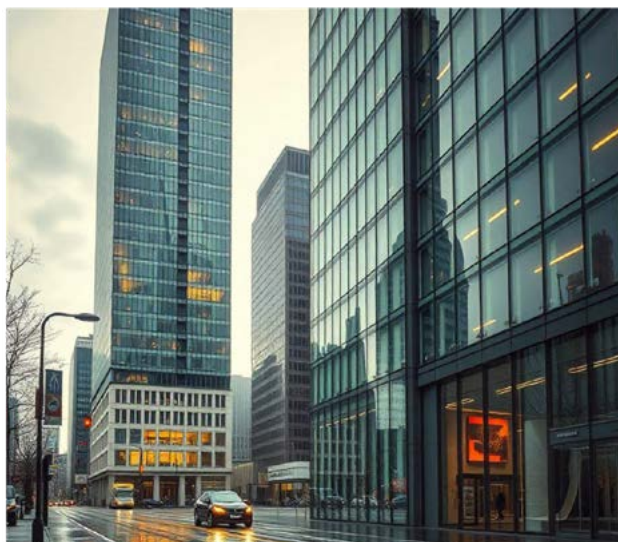
Tabla 1. Pronóstico de crecimiento del sector de la construcción.

Sector de la construcción a nivel mundial	Crecimiento pronosticado para el 2024
Construcción en general	3.5 %
Subsector residencial	4.8 %
subsector no residencial	3.7 %
Subsector Edificación en México	4.10 %

Estas tendencias de la industria de la construcción corroboran el crecimiento vertical, principalmente en las grandes ciudades, que a su vez representa un potencial para la instalación de CSL.

Tendencia de crecimiento de la industria del vidrio plano

Tal como se discutió en la sección anterior, a nivel mundial, en las grandes ciudades existe una tendencia de crecimiento vertical. En la arquitectura moderna de los edificios sobresalen las fachadas de vidrio (ventanales) en una gran variedad de estructuras (ver Figura 3). De esta manera, a la par del crecimiento de la industria de la construcción, también existe una tendencia favorable en la industria del vidrio plano.

**Figura 3.** Edificio con fachada de vidrio, arquitectura predominante en grandes edificios

La industria del vidrio abarca el vidrio recocido, vidrio reflectante, vidrio revestido, etc., que cubre la demanda de espejos, botellas, vidrio automotriz, vidrio para paneles solares, pantallas de dispositivos electrónicos y vidrio plano para ventanas, entre otras aplicaciones. En el caso del sector del vidrio plano, se estima que el mercado mundial en el 2024 es de 114 347 millones de dólares con una proyección a los 14 676 millones de dólares para el 2029, es decir, una tasa de crecimiento anual de 5.28 %. (Intelligence, 2024), mientras que para México la estimación de crecimiento es de 4.92 %.

El crecimiento del subsector de la construcción de edificios (habitacional y no habitacional) provoca la misma tendencia para la industria del vidrio plano, pues ambos sectores están correlacionados; a su vez, estos valores dan una idea de la cantidad de metros cuadrados que podrían ser espacios para albergar la instalación de CSL. El aprovechamiento de estos espacios, sin duda alguna, colocaría a los CSL como una de las tecnologías que podrían predominar en el mercado del aprovechamiento de energías renovables.

Demanda energética de los edificios

El consumo o demanda energética de los edificios es muy dependiente de la ubicación geográfica, ya que, mientras en las regiones heladas los edificios tendrán una mayor demanda por los sistemas de calefacción, y de manera contraria, las regiones cálidas necesitarán sistemas de enfriamiento (aires acondicionados), en contraste con las regiones de clima templado, donde estos sistemas de aclimatación son de uso reducido.

Se estima que el 34 % de la demanda energética mundial es del 37 % (UNEP, 2024). Estos valores no han pasado desapercibidos; en el 2015, en la Asamblea General de las Naciones Unidas, se establecieron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con el propósito de lograr un futuro más sostenible. Entre estos objetivos, el número 7 es denominado “Energía asequible y no contaminante”. Bajo esta visión, muchos países han implementado políticas públicas, como incentivos fiscales a edificios sustentables o coinversión para la instalación de sistemas de energía verde (UNEP, 2024). Por su parte, en México existen las Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética (NOM-ENER), que defi-

nen especificaciones técnicas para garantizar un uso más eficiente de la energía, entre ellas la NOM-020-ENER-2011, que habla de las eficiencias energéticas en edificaciones habitacionales, y LA NOM-008-ENER-2001 para edificios no residenciales (México, 2024).

Las acciones tomadas por el sector constructor para disminuir el consumo eléctrico van desde pinturas aislantes de calor, ventanas polarizadas o atenuadas (entintadas) para regular la transmisión de radiación que se recibe del ambiente; en cuanto al aprovechamiento de energía renovable, predominan los calentadores de agua solar y paneles fotovoltaicos. En los próximos años, la implementación de concentradores solares luminiscentes como sistemas de aprovechamiento de energía solar en edificios podría contribuir de manera significativa a la sustentabilidad prevista por las políticas públicas que se han ido sumando en la industria de la construcción.

Retos de los concentradores solares para los próximos años

Como toda tecnología emergente, insertarse en el mercado implica grandes retos; en el caso de los concentradores solares luminiscentes, estos retos van desde lo técnico hasta lo económico. La lista de dificultades puede ser muy amplia, pero para no extender la discusión, a continuación se mencionan las de mayor consideración.

Actualmente, la principal dificultad técnica, que aún no ha quedado resuelta por completo, es el problema del escalamiento de los sistemas CSL. Muchos de los materiales luminiscentes utilizados en los CSL presentan el fenómeno de reabsorción (ver Figura 4a). Esto significa que una parte del espectro de absorción se superpone con el espectro de emisión. De esta manera, al momento en que el material sea excitado por la radiación de luz, ocurrirá un proceso de emisión; sin embargo, entre mayor sea la dimensión de la hoja de vidrio (ventana), menos probabilidad habrá para que dicha emisión llegue hasta la orilla, ya que en su trayecto encontrará otras partículas luminiscentes que reabsorberían parte de la emisión. (Figura 4b) (Ten Kate, 2014). Además, debido a que la parte de luz de interés viaja a través de la hoja de vidrio por el fenómeno de reflexión interna total, por lo que, de igual manera, conforme las

dimensiones del sistema son mayores, es más probable que una porción de luz escape del sistema.

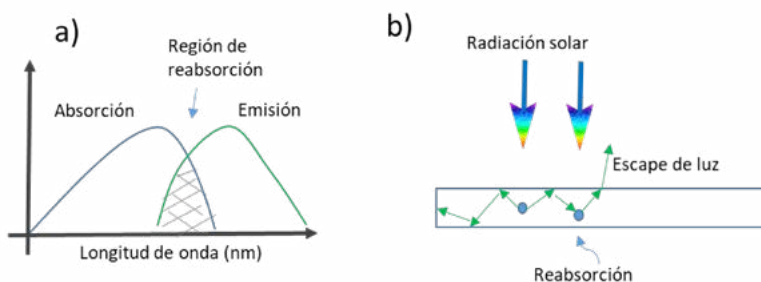


Figura 4. a) Curvas de absorción y emisión que se superponen en una región del espectro electromagnético, b) hoja de vidrio (vista transversal), donde se muestra partículas luminiscentes siendo excitadas por radiación solar, la figura muestra el fenómeno de reabsorción y escape de luz

Por otra parte, tal como se ha mencionado, esta tecnología está enfocada para instalarse en las fachadas de grandes edificios; sin embargo, como ya se sabe, en la industria de la construcción las inversiones para el desarrollo de estos proyectos inmobiliarios son de montos millonarios. De esta manera, convencer a los inversionistas de apostar por una tecnología emergente suele ser poco atractivo para ellos, ya que es considerada como inversión de alto riesgo.

Para este tipo de situaciones, la propuesta es comenzar con pruebas piloto en un área segmentada de algún edificio; esto abonaría en datos sólidos de costo/beneficio de los CSL, para poder reducir el riesgo de inversión.

Prospectiva de los CSL

Con lo anteriormente discutido, la prospectiva en los próximos años para los CSL, a corto plazo, se deberá consolidar los materiales que integran el sistema; estos deberán ser amigables con el ambiente, con una vida útil relativamente larga y buenas eficiencias en los fenómenos ópticos que intervienen. Sin embargo, tal como ya se mencionó, el mayor reto es lograr el escalado del sistema a dimensiones mayores, típicamente en ventanales de algunos metros de longitud.

A mediano plazo, se deben instalar sistemas pilotos en segmentos de fachadas de edificios; esto contribuirá a evaluar los sistemas en condiciones reales y, en caso de resultados favorables, alentará a posibles inversionistas para el desarrollo de inmuebles con estos sistemas. Sin duda, esto puede ser impulsado en edificios gubernamentales, con el apoyo de los gobiernos locales de las grandes ciudades. Finalmente, a largo plazo, una vez que los sistemas de CSL reafirmen su potencial, la industria de la construcción deberá implementar la logística de instalación y uso masivo de esta tecnología.

Conclusión

Los concentradores solares luminiscentes representan una oportunidad innovadora para la industria de la construcción y el vidrio plano, ofreciendo una solución estética y eficiente para la recolección de energía solar. Su integración en ventanas y fachadas de edificios tiene el potencial de revolucionar la manera en que concebimos el uso de la energía en entornos urbanos, alineándose con las tendencias globales hacia una arquitectura más sostenible y autosuficiente. Sin embargo, la plena realización de su potencial dependerá de avances tecnológicos y colaboraciones estratégicas en el sector.

Referencias

- André, P. S. (2024). Artificial neural networks for predicting optical conversion efficiency in luminescent solar concentrators. *Solar Energy*, Vol 268, 112290.
- Arias, D. G. (2022). Estado del Arte: Incentivos y Estrategias para la Penetración de Energía Renovable. *Revista Técnica energía*, 18 (2), 91-103.
- Atradius. (2023). construction-industry-trends-global-overview-2023. Retrieved from <https://atradius.com.mx/publicaciones/construction-industry-trends-global-overview-2023-mx.html>
- Cámara Mexicana de La Industria de la construcción. (2024, Noviembre). Retrieved from https://www.cmic.org.mx/ceesco/Paginas/2023/Meses_Informe_Nacional_Construccion.htm

- Debije, M. G. (2012). Thirty years of luminescent solar concentrator research: solar energy for the built environment. *Advanced Energy Materials*, 2 (1), 12-35.
- Enerdata. (2024, Noviembre). Retrieved from <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- Ferreira, R. A. (2024). Predicting the efficiency of luminescent solar concentrators for solar energy harvesting using machine learning. *Scientific Reports* 14 (1), 4160.
- Griffini, G. (2019). Host matrix materials for luminescent solar concentrators: recent achievements and forthcoming challenges. *Frontiers in Materials*, 6, 29.
- Intelligence, M. (2024, Noviembre). Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/flat-glass-market>
- Kaysir, M. R. (2016). Modeling of stimulated emission based luminescent solar concentrators. *Optics Express*, 24 (26), A1546-A1559.
- México, G. d. (2024, Noviembre). Retrieved from <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-en-eficiencia-energetica-vigentes>
- Moraitis, P. S. (2018). Nanoparticles for luminescent solar concentrators-a review. *Optical Materials*, 84, 636-645.
- Rafiee, M. C. (2019). An overview of various configurations of Luminescent Solar Concentrators for photovoltaic applications. *Optical Materials*, Vol 91, 212-227.
- Richards, B. S. (2023). Luminescent solar concentrators for building integrated photovoltaics: opportunities and challenges. *Energy & Environmental Science*, 16 (8), 3214-3239.
- Savaète, B. J. (2021). The World of the Flat-glass Industry: Key Milestones, Current Status, and Future Trends. *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture*, 1135-1146.
- Ten Kate, O. M. (2014). Quantifying self-absorption losses in luminescent solar concentrators. *Applied optics*, 53 (23), 5238-5245.
- UNEP. (2024, Noviembre). Retrieved from <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- UNEP. (2024, Noviembre). Retrieved from. <https://www.unep.org/es/resources/informe/estado-mundial-de-los-edificios-y-la-construccion>

Capítulo 10

Los puntos cuánticos y la energía renovable

Carlos Rudamas¹

carlos.rudamas@ues.edu.sv

José Ricardo Estrada García¹

eg19011@ues.edu.sv

Oscar Deodanes¹

jd15002@ues.edu.sv

Nelson Cisneros¹

mc19069@ues.edu.sv

Jorge Cuadra¹

jorge.cuadra@ues.edu.sv

Luis Miguel Alvarenga Jacobo¹

aj21003@ues.edu.sv

<https://doi.org/10.61728/AE20252045>



¹ Facultad de Ciencias Naturales y Matemática Universidad de El Salvador

Resumen

Los puntos cuánticos poseen excelentes propiedades ópticas y electrónicas que tienen una gran aplicación en la fabricación de dispositivos de energías renovables que pueden contribuir en el combate contra el cambio climático. El otorgamiento en 2023 del premio Nobel a algunos de los investigadores que han trabajado en su fabricación ha dado mayor realce y difusión al uso de estos en diferentes campos, como la optoelectrónica, medicina, agricultura, ciencia de materiales, etc. En este trabajo se pretende dar una breve introducción a algunos de los fundamentos físicos de este tipo de nanoestructuras. Se define lo que se entiende por puntos cuánticos, y se compara con las propiedades de otras estructuras cuánticas semiconductoras. Se mencionan algunos métodos de preparación y síntesis y se describen brevemente sus propiedades optoelectrónicas. También se muestran resultados del efecto de confinamiento cuántico observado en espectros de absorción y emisión de puntos cuánticos coloidales con tamaños entre 2 y 4 nm aproximadamente. Al final se describen algunas aplicaciones de los puntos cuánticos en tecnologías amigables con el medioambiente y se mencionan nuevos materiales basados en carbono como una alternativa que eliminaría la toxicidad de los semiconductores en los dispositivos y que contribuiría a disminuir la contaminación ambiental provocada por los desechos de estas tecnologías.

Introducción

El término Punto Cuántico (QD: Quantum Dot) se refiere generalmente a nanoestructuras, normalmente fabricadas a partir de materiales semiconductores, que confinan portadores de carga en todas las dimensiones espaciales. La expresión fue acuñada por primera vez en los años ochenta. La primera realización experimental fue obra de Ekimov y colaboradores (1981) en forma de nanocristales de CuCl en una matriz dieléctrica transparente. Mediante el diseño, la elección del material y las técnicas

de fabricación, es posible crear QD que puedan atrapar electrones, huecos o excitones (un complejo formado por un electrón de la banda de conducción unido electrostáticamente a un hueco de la banda de valencia).

Los QD se pueden obtener de diferentes formas: i) como fluctuaciones locales de espesor en pozos cuánticos (Zrenner, 1994); ii) como nanocristales semiconductores en soluciones acuosas (Rossetti, 1983); iii) QD coloidales sintetizados a partir de compuestos precursores disueltos en soluciones (Bawendi, 1990; Brus, 1991; Ponce y Rudamas, 2015; Alvarenga, 2015; Deodanes, 2020; Deodanes, 2021); iv) QD definidos electrostáticamente y formados por puertas eléctricas sobre un gas bidimensional de electrones (Kouwenhoven, 1991; Ciorga, 2000; Elzerman, 2004); v) QD modelados artificialmente mediante grabado y/o estructuración fotolitográfica del sustrato (Forchel, 1988) o vi) QD autoensamblados mediante deposición de vapor metal-orgánico o epitaxia de haces moleculares de materiales de diferente constante de red (Schaffer, 1983; Goldstein, 1985; Eaglesham, 1990; Leonard, 1993; Solomon, 1996; Rudamas, 2002a; Martínez, 2003; Rudamas 2002b).

Recientemente, en el año 2023, el premio Nobel de Química fue otorgado por el descubrimiento y desarrollo de los QD, lo que resalta la importancia que estas nanoestructuras tienen en múltiples aplicaciones científicas y tecnológicas (Nobel Prize, 2023).

Cuando el movimiento de los portadores de carga en un sólido se restringe en una capa de espesor del orden de la longitud de onda de De Broglie, los efectos cuánticos empiezan a ser apreciables en los estudios de estas estructuras. Recordando, la longitud de onda de De Broglie, λ , viene dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{3m_e kT}} \quad (1)$$

Donde m_e representa la masa efectiva del portador de carga, T la temperatura y k la constante de Boltzmann. Considerando la masa efectiva de los portadores, los efectos cuánticos podrían observarse aproximadamente a espesores de capas del orden de 10 a 1000 veces la constante de red de los materiales semiconductores. Trabajando con estos tamaños,

se pueden preparar o sintetizar estructuras que permitan el estudio de efectos cuánticos que puedan ser usados para mejorar el rendimiento de dispositivos ya existentes en el mercado, como por ejemplo láseres de pozo cuántico, diodos emisores de luz (LEDs: Light Emitting Diodes), moduladores basados en el efecto Stark cuántico, celdas solares, etcétera.

Dependiendo del grado de confinamiento de los portadores de carga, las estructuras cuánticas se clasifican en estructuras bidimensionales (2D), unidimensionales (1D) y cero-dimensionales (0D). El pozo cuántico es el ejemplo más simple de las estructuras con confinamiento cuántico cuasi-2D. Este consiste en una capa fina de un material semiconductor incrustado entre dos capas de otro material con una anchura de banda prohibida (conocida comúnmente en inglés como band gap) más grande, formando así un desalineamiento de bandas. De esta forma, los portadores de carga se confinan en el material con menor anchura de banda prohibida. El correspondiente desalineamiento de las bandas se ilustra esquemáticamente en la Figura 1.

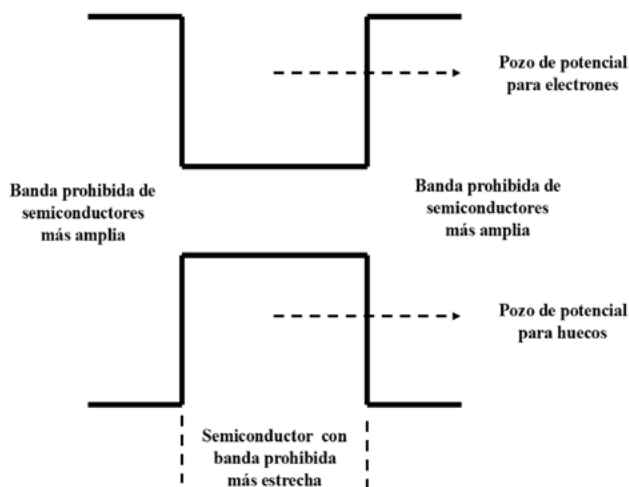


Figura 1. Desalineamiento de bandas en una estructura de pozo cuántico

La capa con menor anchura de banda prohibida se comporta como un pozo de potencial tanto para electrones como para los huecos, mientras

que las capas del material con anchura de banda prohibida mayor se comportan como barreras de potencial para los portadores de carga confinados en el pozo. Una forma de obtener estructuras cuánticas semiconductoras de más baja dimensión, como los llamados hilos cuánticos (estructuras 1D conocidas en inglés como quantum wires, QWires) y QDs (estructuras 0D), sería diseñarlas a partir de las estructuras cuasi-2D, utilizando para ello técnicas litográficas. La precisión de estas técnicas alcanza ≈ 10 nm. (Weisbuch, 1991). Sin embargo, el daño que se le produce con el procedimiento de lavado químico en superficie (conocido comúnmente en inglés como etching) afecta dramáticamente las propiedades ópticas y electrónicas de la estructura. Entre las consecuencias del daño debido al lavado químico están la disminución de portadores (conocida comúnmente en inglés como carrier depletion), especialmente para tamaños menores de 100 nm en QWs y QDs, la disminución de la eficiencia en la luminiscencia debido a gran cantidad de defectos que se producen, que aumentan la recombinación no radiativa. En este trabajo no se profundizará más en la litografía, pero Bimberg y colaboradores (1999) hacen una discusión detallada acerca de estos métodos litográficos. Otro método de fabricación de estructuras semiconductoras cuánticas cuasi-1D y 0D es la formación de estas, causada por fluctuaciones interfaciales que se producen en una heteroestructura, las cuales crean a su vez fluctuaciones de potencial que forman centros de localización de portadores de carga muy eficientes que pueden interpretarse como puntos cuánticos preparados de forma natural. Estas están caracterizadas por energías de localización pequeñas, gran inhomogeneidad en tamaños y una relativamente pequeña densidad de estados (Bimberg, 1999).

La autoorganización es otro de los métodos de crecimiento de estructuras cuánticas 1D y 0D. Cuando las constantes de red del sustrato y del material depositado sobre él difieren considerablemente (por ejemplo, entre GaAs e InAs, difieren un 7 %), solamente la primera monocapa del material cristaliza epitaxialmente y tensionada debido a la diferente constante de red del sustrato. Cuando se sobrepasa el conocido como espesor crítico, la situación de estrés conduce a un rompimiento del crecimiento de una estructura ordenada y a la creación espontánea de islas de forma regular y tamaños similares distribuidas aleatoriamente. La forma y el tamaño dependen, en general, principalmente de factores

como la situación de estrés presente en la heteroestructura, la temperatura y la razón de crecimiento. Esta transición de fase de una estructura epitaxial al ordenamiento aleatorio de islas es conocida como transición Stranski-Krastanow. Las estructuras formadas mediante esta transición de fase son conocidas como estructuras autoorganizadas o autoensambladas. Entre las ventajas de este método de crecimiento se pueden mencionar los tamaños tan pequeños que se pueden alcanzar (< 30 nm), la homogeneidad en forma y tamaños junto a una perfecta estructura cristalina de las estructuras crecidas. A esto cabe añadir lo relativamente fácil del proceso de crecimiento, sin la necesidad de recurrir a procesos litográficos complejos. Este método de formación de islas coherentes (es decir, islas libres de defectos), está siendo explotado en la actualidad para el crecimiento de nanoestructuras.

Los QD también se han sintetizado utilizando métodos coloidales. En estos métodos, generalmente se emplean solventes, precursores y surfactantes orgánicos. A menudo, esta síntesis se lleva a cabo en una atmósfera inerte, a una temperatura de reacción superior a la requerida para que el precursor se convierta en monómero, es decir, átomos activos y especies moleculares. Este proceso se denomina nucleación. Posteriormente, los monómeros se transforman en nanocristales que continúan creciendo, dependiendo, entre otros factores, de la cantidad de surfactantes superficiales (Murray, 2000; Farkhani 2014; Bawendi, 1990).

Estructura de bandas y densidad de estados en estructuras cuánticas

En el caso de un pozo de potencial con barreras finitas, el problema de encontrar las energías que pueden tener los portadores de carga es relativamente fácil de resolver. Esto requiere que se asuman ciertas condiciones de frontera para su resolución. La primera condición es obvia: la función de onda debe ser continua en las interfaces. La segunda condición necesaria para resolver la ecuación (de segundo orden) de Schrödinger no parece tan obvia, ya que no se puede suponer que la derivada de la función de onda sea continua debido a que las masas efectivas son diferentes a los dos lados de la interfaz y esta condición no conservaría el flujo de partículas a través de esta. Sin embargo, realizando algunas

consideraciones se puede resolver el problema gráficamente, de una manera muy sencilla. Las soluciones se muestran esquemáticamente en la Figura 2. Es evidente que las energías permitidas que los portadores de carga pueden tener dejan de formar una banda de energías, como las bandas de energía que se obtienen en el caso de estructuras 3D. Por el contrario, las energías permitidas son discretas, como se puede apreciar en la Figura 2.

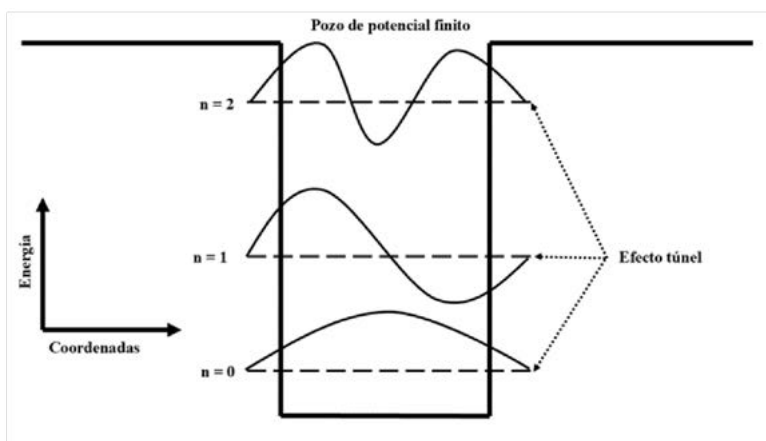
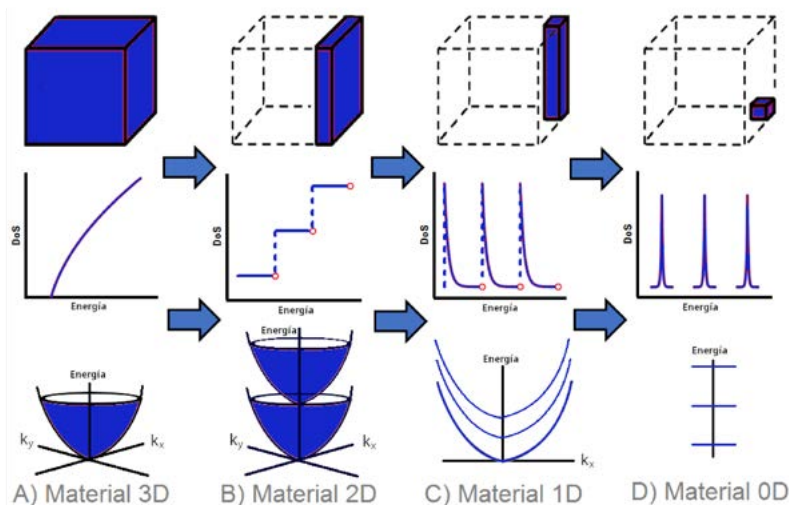


Figura 2. Diagrama de un pozo potencial con barreras finitas. Se muestran esquemáticamente los primeros dos estados energéticos junto a su correspondiente función de onda, las cuales penetran la barrera

Así como la energía en estructuras 2D, la densidad de estados (DOS: Density Of States) también sufre cambios (la DOS se podría definir como el número existente de estados por cada intervalo de energía). En el plano k_x k_y el movimiento es libre y es de esperar que la DOS no se vea afectada, pero el movimiento en la dirección de crecimiento está restringido debido al confinamiento espacial, lo que produce que k_z tome solo ciertos valores, es decir, está cuantizado. La DOS se puede describir como una función escalón, muy diferente a la DOS en el caso 3D. Los resultados para la densidad de estados en estructuras 3D y 2D se muestran esquemáticamente en la Figura 3. El cálculo de la DOS no se discute, ya que no es el objetivo de este trabajo.

Figura 3. Esquemas de los estados energéticos y la correspondiente DOS para estructuras semiconductoras 3D en A), 2D en B), 1D en C) y 0D en D)



Si ahora el confinamiento se reduce a una dimensión (hilos cuánticos), basta con considerar, en una aproximación muy simple al problema, que la longitud L_y en una estructura de pozo cuántico se vuelve muy pequeña. Entonces cabe esperar efectos de cuantización también en la dirección y . Solamente en la dirección x el movimiento de los electrones se mantiene libre. Los resultados para las energías y la DOS para hilos cuánticos también se pueden observar en la Figura 3, que evidencian un gran cambio si se compara con estructuras 3D y 2D.

En el caso de un confinamiento en las tres direcciones (QDs), una de las formas de tratar el problema es considerar que, debido a la reducción de la dimensión x , la interacción electrón-hueco no se puede despreciar y debe incluirse en la solución del problema. Por ejemplo, con un potencial de forma esférica. Los resultados para este caso también se muestran en la Figura 3. Es claro que los estados energéticos en QDs tampoco forman bandas. Estos estados se asemejan a los de un átomo, por lo que los QDs también se conocen como “átomos artificiales” (Yi, 2016). Este hecho tiene enormes consecuencias sobre la DOS, que también se observa en la Figura 3.

Es importante aclarar que el cálculo de las energías y la DOS es un poco diferente para electrones y huecos. El cálculo de los estados de energía de los huecos se vuelve un poco complicado debido a que no se puede obviar la interacción de las diferentes bandas de valencia.

Propiedades de absorción y emisión de los puntos cuánticos.

En nuestro grupo se han estudiado en los últimos años puntos cuánticos coloidales (CQD) debido a la amplia gama de aplicaciones que tienen en sistemas de bioimagen, láseres, LEDs y dispositivos fotovoltaicos (Alvarenga, 2018; Pleitez, 2021; Ponce, 2015; Deodanes 2020; Deodanes 2021). Algunas de las ventajas del uso de los CQD son su relativamente fácil proceso de síntesis y la sencilla sintonización de su emisión. Esta última está directamente relacionada con el tamaño de los QD y se explica por el efecto de confinamiento cuántico. En la Figura 4, se pueden observar espectros de absorción de QD de tamaños comprendidos entre 2.00 y 4.09 nm aproximadamente. El efecto de confinamiento cuántico se observa aquí como un desplazamiento al rojo de la absorción del borde de banda cuando aumenta el tamaño de los QD.

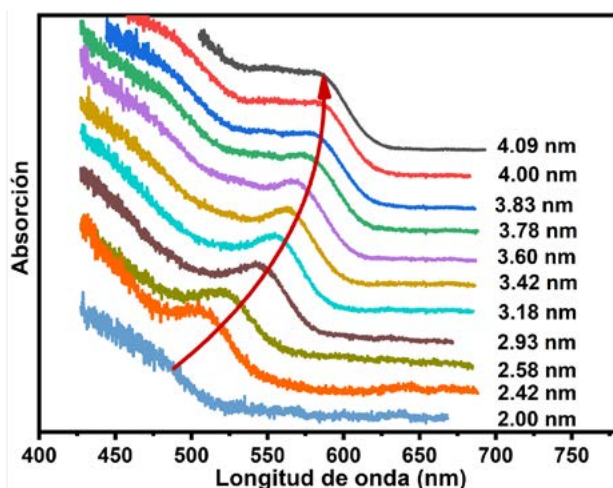


Figura 4. Espectros de absorción de QDs de CdSe con diferentes tamaños.
Nota. Elaboración propia con datos de Pleitez (2021).

La Figura 5 muestra los espectros de fotoluminiscencia (PL: photoluminescence) de las mismas muestras sintetizadas. Se observan claramente dos bandas de emisión, especialmente para los QD pequeños. La banda a energías más altas está asociada a la emisión del borde de banda, mientras que la banda ancha a energías más bajas tiene su origen en la recombinación de portadores de carga atrapados en defectos superficiales (Pleitez, 2021). También se observa un desplazamiento hacia el rojo de la emisión de borde de banda cuando aumenta el tamaño del QD. Adicionalmente, observamos una disminución de la emisión de la banda de defectos superficiales para tamaños de QD mayores. Esto podría entenderse teniendo en cuenta la disminución de la razón superficie-volumen con el aumento del tamaño de los QD. La relación superficie-volumen es inversamente proporcional al tamaño de los QD, lo que significa que en los QD más pequeños hay una mayor proporción de átomos superficiales, en relación con el número total de átomos en la estructura (Alvarenga, 2018).

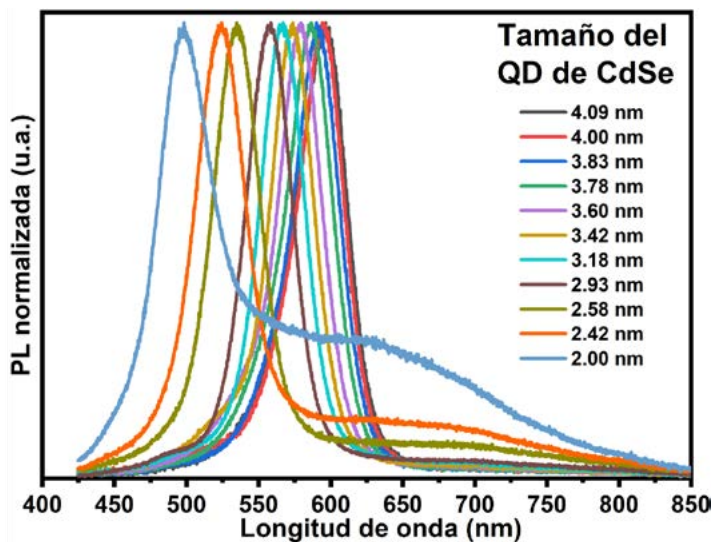


Figura 5. Espectros de PL normalizados al máximo del borde de banda para diferentes tamaños de QD de CdSe. Elaboración propia con datos de Pleitez (2021)

En estas nanoestructuras, las interacciones superficiales desempeñan uno de los papeles más importantes en lo que respecta al rendimiento de sus

propiedades optoelectrónicas. Durante el proceso de síntesis se utilizan ligandos de cadena larga como la trioctilfosfina (TOP). Estas cadenas largas son capaces de dar estabilidad coloidal y asegurar la formación de los QDs. Sin embargo, estas cadenas largas podrían ir en contra de un transporte eficiente de portadores (Pleitez, 2021; Alvarenga, 2018). En este trabajo no se profundizará en el tema y se refiere al lector a las referencias bibliográficas citadas en esta sección.

Algunas aplicaciones en energías renovables y medioambiente

Actualmente, hay un gran interés en fomentar tecnologías que disminuyan el impacto ambiental generado por la quema de combustibles fósiles. En particular, la energía fotovoltaica es una de las mejores alternativas al uso de recursos petrolíferos, esto debido a que la luz solar es el recurso renovable más asequible y abundante hasta la fecha (Sargent, 2012). La tecnología solar fotovoltaica es una de las mejores formas de utilizar la energía solar para generar electricidad con celdas solares. Sin embargo, la industria de energía solar ha llevado las eficiencias de las celdas solares convencionales (basadas en silicio y en película delgada) cerca de sus límites prácticos, dicha eficiencia máxima teórica es conocida como límite de Shockley-Queisser y es de alrededor del 33.7 % (Malgras, 2017).

La versatilidad y las propiedades físicas únicas de los QD tienen el potencial de revolucionar diversas tecnologías, especialmente en el ámbito de la energía solar (Bera, 2010). Una de sus características más notables es su capacidad para sintonizar el máximo de absorción, lo que les permite captar de manera eficiente diferentes regiones del espectro solar mediante un ajuste preciso de su tamaño. Además, en materiales convencionales, los portadores de carga generados por fotones de alta energía suelen perder rápidamente su exceso de energía en forma de calor debido a interacciones con la red cristalina. En contraste, los QD presentan propiedades que pueden mitigar estas pérdidas, incrementando significativamente la eficiencia energética de los dispositivos. Esto lo logran al recolectar estos portadores calientes (conocidos comúnmente en inglés como *hot carriers*) antes que se relajen, utilizando su alta energía para generar mayor voltaje o realizar procesos adicionales, lo

que incrementa la eficiencia del dispositivo. Otro mecanismo clave es la generación múltiple de excitones (MEG: Multiple Exciton Generation), que permite que un solo fotón de alta energía genere múltiples pares electrón-hueco. En las celdas solares convencionales, solo se produce un excitón por fotón absorbido, lo que limita la corriente generada. Sin embargo, los QD pueden dividir la energía de un fotón en varios excitones, maximizando la extracción de energía de cada fotón y aumentando significativamente la corriente eléctrica generada por la celda, proceso representado en la figura 6. Este fenómeno es particularmente efectivo para aprovechar la porción de alta energía del espectro solar que, en las tecnologías actuales, se desperdicia como calor (Semonin, 2012).

De acuerdo con cálculos realizados por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL: National Renewable Energy Laboratory), las celdas solares con QD podrían alcanzar una eficiencia superior al 66 %, lo que representa más del doble del límite teórico de Shockley-Queisser (Solar, 2013). No obstante, aún se deben realizar múltiples estudios para aprovechar todos estos fenómenos y con ello mejorar la eficiencia de las celdas solares actuales.

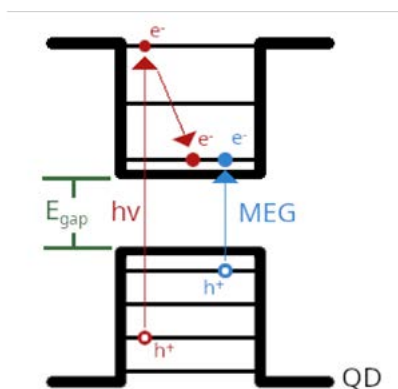


Figura 6. *Termalización de portadores calientes en un QD que se describe cualitativamente con un modelo de pozo cuántico. Elaboración propia con ideas tomadas de Nozik (2009)*

Adicionalmente, gracias a las excepcionales propiedades de emisión de los QD, estos se emplean como materiales luminiscentes en dispositivos

LEDs, los cuales son capaces de reducir significativamente el consumo energético debido a su baja frecuencia de umbral. (Deodanes, 2020; Deodanes, 2021). Estos últimos sistemas pueden ser desarrollados usando el enfoque de electroluminiscencia o conversión descendente. La electroluminiscencia ocurre cuando una corriente eléctrica atraviesa un material, generando principalmente recombinaciones radiativas, responsables de la emisión de luz. Por otro lado, el enfoque de conversión descendente, consiste en utilizar materiales luminiscentes para transformar la luz de alta energía (longitud de onda corta), como la ultravioleta, en luz de menor energía (longitud de onda larga), como la visible (Deodanes, 2020; Deodanes, 2021).

Las baterías de estado sólido son otras de las aplicaciones en la que los QD están siendo utilizados. Hoy en día, estas baterías tienen algunas limitantes, tales como su alta impedancia que afecta su eficiencia, las reacciones no deseadas entre superficies y problemas en la interfaz entre el electrolito sólido y los electrodos que pueden comprometer su rendimiento y su durabilidad. Es aquí donde los QD pueden utilizarse en los electrodos de la batería para mejorar su capacidad y densidad de energía, si se añaden al electrolito, aumenta su conductividad iónica y si se implementan en los separadores pueden optimizar el camino de transmisión iónica y su tasa de conducción (Xu, 2022).

Consideraciones finales

En este trabajo se han presentado brevemente algunas de las propiedades ópticas y electrónicas de los QD. Algo muy importante es que estas propiedades podrían permitir la mejora en el funcionamiento de algunos dispositivos optoelectrónicos, como las celdas solares, en las que el uso de los QD podría incrementar significativamente su eficiencia y, al mismo tiempo, disminuir la cantidad de material tóxico en los paneles solares, contribuyendo así a disminuir la contaminación ambiental cuando estos son desechados (Rudamas, 2024). Es importante mencionar que en nuestro grupo, como en muchos otros en el mundo, ya se está trabajando en la síntesis y caracterización de CQD con materiales basados en carbono, como una alternativa aún más amigable con el medioambiente (Cuadra, 2018; Cuadra, 2020; Rudamas, 2023; Rudamas, 2024).

Los QD también pueden jugar un papel muy importante en la construcción de baterías amigables con el medioambiente que podrían revolucionar el almacenamiento de energía. Además, se pueden usar en la fabricación de LEDS para luminarias de estado sólido que contribuirían a una disminución del consumo de energía. Si pensamos que la generación de energía por la quema de combustibles fósiles todavía predomina en el mundo, el uso de los QD en luminarias de estado sólido contribuiría a una menor contaminación ambiental.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (SIC-UES) por el financiamiento parcial de este trabajo bajo los proyectos 05.31, 06.18, 09.19 y 09.20. Se agradece también a CSUCA-IDRC por financiar parcialmente este trabajo bajo el proyecto 50-ES. Se agradece al Lic. David Pleitez y al Dr. David Valenzuela por las fructíferas discusiones y poner a disposición algunos resultados de sus investigaciones.

Referencias

- Alvarenga, S., Ponce, H., Oliva, I. G. y Rudamas, C. (2018). *Changes on the Stokes shift in large CdSe colloidal quantum dots by a ligand exchange*. Proceedings of the 2nd International Conference of Theoretical and Applied Nanoscience and Nanotechnology (TANN'18). <https://doi.org/10.11159/tann18.140>
- Bawendi, M. G., Steigerwald, M. L. y Brus, L. E. (1990). The quantum mechanics of larger semiconductor clusters ("quantum dots"). *Annual Review of Physical Chemistry*, 41(1), 477-496. <https://doi.org/10.1146/annurev.pc.41.100190.002401>
- Bera, D., Qian, L., Tseng, T. K. y Holloway, P. H. (2010). *Quantum dots and their multimodal applications: a review*. *Materials*, 3(4), 2260-2345. <https://doi.org/10.3390/ma3042260>
- Bimberg, D., Grundmann, M. y Ledentsov, N. N. (1999). *Quantum dot heterostructures*. John Wiley & Sons. [https://doi.org/10.1016/s0026-2692\(99\)00093-2](https://doi.org/10.1016/s0026-2692(99)00093-2)

- Brus, L. (1991). Quantum crystallites and nonlinear optics. *Applied Physics A*, 53, 465-474. <https://doi.org/10.1007/bf00331535>
- Ciorga, M., Sachrajda, A. S., Hawrylak, P., Gould, C., Zawadzki, P., Jullian, S. y Wasilewski, Z. (2000). Addition spectrum of a lateral dot from Coulomb and spin-blockade spectroscopy. *Physical Review B*, 61(24), R16315. <https://doi.org/10.1103/physrevb.61.r16315>
- Cuadra, J., Ponce, H. y Rudamas, C. (2018). *Optical properties of graphene carbon quantum dots for solar cells applications*. In 2018 IEEE 38th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII). IEEE. <https://doi.org/10.1109/concapan.2018.8596611>
- Cuadra, J., Ponce, H. y Rudamas, C. (2020). Interlayer transition in graphene carbon quantum dots. *MRS Advances*, 5(63), 3345-3352. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.410>
- Deodanes, O., Cuadra, J., Ponce, H., Molina, J. C., Pleitez, D., Violantes, C. y Rudamas, C. (2021). White light emitting diode prototypes based on cadmium sulfide and graphene carbon quantum dots. *Revista Comunicaciones Científicas Y Tecnológicas*, 6(1), 15. <https://revistas.ues.edu.sv/index.php/comunicaciones/article/view/2133>
- Deodanes, O., Molina, J. C., Violantes, C., Pleitez, D., Cuadra, J., Ponce, H. y Rudamas, C. (2020). *White Light Emitting CdS Quantum Dot Devices Coated with Layers of Graphene Carbon Quantum Dots*. *MRS Advances*, 5(63), 3337-3343. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.436>
- Eaglesham, D. J. y Cerullo, M. (1990). Dislocation-free Stranski-Krastanow growth of Ge on Si (100). *Physical Review Letters*, 64(16), 1943. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.64.1943>
- Ekimov, A. (1981). Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals. *JETP Letters*, 34, 345. <https://doi.org/10.1134/s0021364023130040>
- Elzerman, J. M., Hanson, R., Willems van Beveren, L. H., Witkamp, B., Vandersypen, L. M. K. y Kouwenhoven, L. P. (2004). Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot. *Nature*, 430(6998), 431-435. <https://doi.org/10.1038/nature02693>
- Forchel, A., Leier, H., Maile, B. E. y Germann, R. (1988). *Fabrication and optical spectroscopy of ultra-small III-V compound semiconductor structures*. In Festkörperprobleme 28: Plenary Lectures of the 52nd

- Annual Meeting of the German Physical Society (DPG) (pp. 99-119). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/bfb0107850>
- Goldstein, L., Glas, F., Marzin, J. Y., Charasse, M. N. y Le Roux, G. (1985). Growth by molecular beam epitaxy and characterization of InAs/GaAs strained-layer superlattices. *Applied Physics Letters*, 47(10), 1099-1101. <https://doi.org/10.1063/1.96342>
- Kouwenhoven, L. P., Johnson, A. T., Van der Vaart, N. C., Harmans, C. J. P. M. y Foxon, C. T. (1991). Quantized current in a quantum-dot turnstile using oscillating tunnel barriers. *Physical Review Letters*, 67(12), 1626. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.67.1626>
- Leonard, D., Krishnamurthy, M., Reaves, C., DenBaars, S. P. y Petroff, P. M. (1993). Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. *Applied Physics Letters*, 63(23), 3203-3205. <https://doi.org/10.1063/1.110199>
- Malgras, V., Nattestad, A., Kim, J. H., Dou, S. X. y Yamauchi, Y. (2017). Understanding chemically processed solar cells based on quantum dots. *Science and Technology of advanced MaTerialS*, 18(1), 334-350. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1317219>
- Martinez-Pastor, J., Alén, B., Rudamas, C., Roussignol, P., García, J. M. y González, L. (2003). Vertical stacks of small InAs/GaAs self-assembled dots: resonant and non-resonant excitation. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 17, 46-49. [https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(02\)00734-8](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(02)00734-8)
- Murray, C. B., Kagan, C. R. y Bawendi, M. G. (2000). Synthesis and characterization of monodisperse nanocrystals and close-packed nanocrystal assemblies. *Annual Review of Materials Science*, 30(1), 545-610. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.30.1.545>
- Mussa Farkhani, S. y Valizadeh, A. (2014). Three synthesis methods of CdX (X = Se, S or Te) quantum dots. *IET Nanobiotechnology*, 8(2), 59-76. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2012.0028>
- Nobel Prize. (2023). *The Nobel Prize in Chemistry 2023*. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2023/summary/>
- Nozik, A. J., Beard, M. C., Luther, J. M., Law, M., Ellingson, R. J. y Johnson, J. C. (2010). Semiconductor quantum dots and quantum dot arrays and applications of multiple exciton generation to third-genera-

- tion photovoltaic solar cells. *Chemical reviews*, 110(11), 6873-6890. <https://doi.org/10.1021/cr900289f>
- Pleitez, D. A. R. (2021). *Estudio del origen y propiedades de las bandas de emisión y absorción en puntos cuánticos coloidales de seleniuro de cadmio* (Tesis de licenciatura). Universidad de El Salvador. <https://repositorio.ues.edu.sv/items/97f5cc15-0d16-4810-a67d-a76767d0adb2>
- Ponce, H. y Rudamas, C. (2015). Caracterización óptica de defectos superficiales en puntos cuánticos coloidales de Seleniuro de Cadmio (CdSe). *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20, 676-681. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620150003.0070>
- Rossetti, R., Nakahara, S. y Brus, L. E. (1983). Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution. *The Journal of Chemical Physics*, 79(2), 1086-1088. <https://doi.org/10.1063/1.445834>
- Rudamas, C., Cuadra, J., Deodanes, O., Cisneros, N., Estrada, R. y Ponce, H. (2024). Caracterización óptica de puntos cuánticos de carbono y grafeno para la transición energética. En F. E. Navarrete Báez (Coord.), *Las energías renovables y la transición energética justa* (1.^a ed., pp. 21–33). Ave Editorial. https://www.researchgate.net/publication/387173977_Las_energias_renovables_y_la_transicion_energetica_justa
- Rudamas, C., Cuadra, J., Deodanes, O., Cisneros, N., Ponce, H. y Molina, J. C. (2023). Nanoestructuras para aplicaciones amigables con el medio ambiente. En F. E. Navarrete Báez (Coord.), *Latinoamérica ante el desafío de las energías renovables* (1.^a ed., pp. 77–91). Ave Editorial. https://www.researchgate.net/publication/387173977_Las_energias_renovables_y_la_transicion_energetica_justa
- Rudamas, C., Martínez-Pastor, J., García-Cristóbal, A., Roussignol, P., García, J. M. y González, L. (2002). Carrier Recombination in InAs/GaAs Self-Assembled Quantum Dots under Resonant Excitation Conditions. *physica status solidi (a)*, 190(2), 583-587. [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(200204\)190:2%3C583::AID-PSSA583%3E3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200204)190:2%3C583::AID-PSSA583%3E3.0.CO;2-8)
- Rudamas, C., Martínez-Pastor, J., García-Cristóbal, A., Roussignol, P., García, J. M. y Gonzalez, L. (2002). Influence of the InAs covera-

- ge on the phonon-assisted recombination in InAs/GaAs quantum dots. *Surface Science*, 507, 624-629. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(02\)01326-2](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(02)01326-2)
- Sargent, E. H. (2012). Colloidal quantum dot solar cells. *Nature photonics*, 6(3), 133-135. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.33>
- Schaffer, W. J., Lind, M. D., Kowalczyk, S. P. y Grant, R. W. (1983). Nucleation and strain relaxation at the InAs/GaAs (100) heterojunction. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1(3), 688-695. <https://doi.org/10.1116/1.582579>
- Semonin, O. E., Luther, J. M. y Beard, M. C. (2012). Quantum dots for next-generation photovoltaics. *Materials today*, 15(11), 508-515. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(12\)70220-1](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(12)70220-1)
- Solar, I. I. (2013). Quantum Dots Promise to Significantly Boost Solar Cell Efficiencies. *Natl. Renew. Energy Lab*. <https://doi.org/10.2172/1090155>
- Solomon, G. S., Trezza, J. A., Marshall, A. F. y Harris Jr, J. S. (1996). Vertically aligned and electronically coupled growth-induced InAs islands in GaAs. *Physical Review Letters*, 76(6), 952. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.76.952>
- Weisbuch, C. y Vinter, B. (2014). *Quantum semiconductor structures: Fundamentals and applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-051557-1.50009-3>
- Xu, Q., Niu, Y., Li, J., Yang, Z., Gao, J., Ding, L. y Xu, C. (2022). Recent progress of quantum dots for energy storage applications. *Carbon Neutrality*, 1(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00002-y>
- Yi, L. (2016). Application of quantum dots as down conversion materials in white LED. *International Journal of Engineering Inventions*, 6, 7-12. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212534231>
- Zrenner, A., Butov, L. V., Hagn, M., Abstreiter, G., Böhm, G. y Weimann, G. (1994). Quantum dots formed by interface fluctuations in AlAs/GaAs coupled quantum well structures. *Physical Review Letters*, 72(21), 3382. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.72.3382>

Capítulo 11

Uso de residuos de plástico para producción de energía y de otros productos químicos de alto valor

Alan Castro-Solano¹

María Fernanda Chagoyán-Bernardo¹

Itzel Del Carmen Fonseca-Barrera¹

Patricia Guillermina Mendoza García¹

Carolina Peña-Montes¹

carolina.pm@veracruz.tecnm.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20252052>



¹ Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Veracruz.

Resumen

Los plásticos son materiales poliméricos sintéticos de alto peso utilizados en diversas áreas, principalmente para empaques de alimentos; lo cual genera cantidades inmensurables de residuos plásticos que terminan en el ambiente, provocando graves problemas de contaminación. Se estima que solo el 9 % de los residuos generados es reciclado y reutilizado en las cadenas de valor. Por lo tanto, se han generado diferentes alternativas tecnológicas para su transformación no convencional con el fin de reducir y aprovecharlos, entre las que se encuentran la conversión de plástico a energía. Un ejemplo es la pirólisis, que es un proceso de descomposición química en ausencia de oxígeno a una temperatura con un rango de 400 a 800 °C, donde se pueden utilizar catalizadores para mejorar la calidad de los productos obtenidos como aceites y gases. El rendimiento y la calidad de los productos varía dependiendo del residuo plástico utilizado y del tipo de pirólisis (térmica o catalítica). Otra alternativa es la bioconversión de residuos plásticos a productos químicos de alto valor, donde el TPA contenido en PET puede ser transformado por biocatálisis en productos como PHA, PHB, ácido gálico, pirogalol, catecol, ácido mucónico y vanílico. En el caso del PP utilizando métodos térmicos y enzimáticos combinados se puede producir PHA y PHB con *Cupriavidus necator* H16 y ácidos grasos como; esteárico, oleico, linolénico, palmítico y palmitoleico con *Yarrowia lipolytica* 78-003.

Generalidades del plástico

La palabra plástico, proviene del griego *πλαστικός* (*plastikos*), que relaciona a materiales poliméricos sintéticos de alto peso molecular que pueden ser moldeados o formados aplicando calor para adquirir formas sólidas o semisólidas McKen, (2013). Estos materiales desde su invención son muy utilizados por el hombre debido a las propiedades que poseen. (Castro et al., 2020). Por tal motivo la producción de plástico ha

aumentado de forma considerable a nivel mundial siendo 400.3 millones de toneladas en 2023, como lo indican cifras de Plastics Europe, 2023, con los países asiáticos como principales productores liderados por China. Así mismo, los principales usos son en la industria de embalajes y empaques (39 %), edificación y construcción (23 %), piezas plásticas de la industria automotriz (8 %), electrónicos (6 %), artículos de casa, ocio y deportes (4 %), agricultura (4 %) y otros productos (16 %). Es importante destacar que los polímeros plásticos más utilizados para estos fines son el polipropileno (PP) con 18.9 %, polietileno de baja densidad (PE-LD) y polietileno lineal de baja densidad (LLD) con 14.1 % y polietileno de alta densidad (PE-HD) y polietileno de densidad media (MD) con un 12.2 % (Plastics Europe, 2023).

Efectos de la contaminación por residuos plásticos

Debido a las actividades antropogénicas que cada vez utilizan más plásticos se generan una cantidad significativa de residuos plásticos que se convierten en un problema de contaminación (Geyer et al., 2017; Castro et al., 2020; Plastics Europe, 2023). En el medioambiente los residuos plásticos son degradados a micro- y nanoplásticos por intemperización provocando grandes problemas a los ecosistemas y organismos que habitan en zonas contaminadas, los cuales los adquieren debido a su alimentación, y por el medioambiente en agua, suelo y aire contaminado. (Castro et al., 2020). (Figura. 1). Dentro los problemas de salud que pueden generar los residuos plásticos a los animales, incluyendo al ser humano, se encuentran su bioacumulación y los efectos de compuestos químicos tóxicos que se adhieren a estos (Cui et al., 2005; Shi et al., 2006; Ball et al., 2011; Luciani et al., 2014; Li et al., 1999).



Figura 1. Contaminación plástica. Fuente: Tomada por Castro-Solano B.A. septiembre 2023.

El reciclaje, la solución a la contaminación por plástico más usada

Una alternativa que contribuye con la disminución de estos residuos es el “reciclaje”; este ayuda a reincorporar los plásticos considerados como desechos en materiales reutilizables en los procesos productivos, evitando así que terminen en los vertederos. Asimismo, con la revalorización de los residuos plásticos disminuye el consumo de materias primas y otros insumos que son utilizados en la extracción, transporte y procesamiento de nuevos materiales (Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México, 2021). Lo anterior implica una disminución de resinas plásticas vírgenes en los productos plásticos, lo que implica una reducción del impacto al medioambiente.

Dentro de las opciones de reciclaje no solo se encuentran aquellas de obtener monómeros de los plásticos para polimerizar, sino también aquellas como la obtención de energía y conversión a productos de interés industrial. (Zhao et al., 2021).

Conversión de plástico

Existen diferentes estrategias de mitigación de estos residuos (Figura 2), entre los que encontramos el reciclaje mecánico, en el cual se lleva a cabo una reducción de tamaño para su aprovechamiento en la manufactura de nuevos artículos; el reciclaje químico, donde a partir del uso de diferentes catalizadores y altas temperaturas, se obtienen productos de interés para la industria, como lo son gases de síntesis a partir de la gasificación, y a partir de la licuefacción, se genera aceite de termólisis para combustibles y productos químicos. Por último, el reciclaje biológico, en el cual, a partir del uso de microorganismos en condiciones de aerobiosis o anaerobiosis, obtenemos una variedad de moléculas de interés biotecnológico (Letcher et al., 2020).

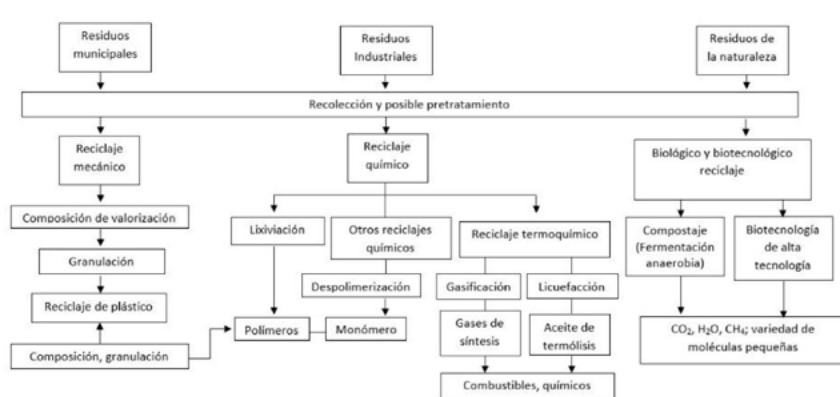


Figura 2. Tecnologías para refinar residuos plásticos. Fuente: Letcher et al., 2020

Conversión de plástico a energía

Una alternativa viable de residuos plásticos, es su gestión mediante métodos de recuperación de energía como la pirólisis, gasificación e incineración. Estas tecnologías tienen como beneficio la producción de energía en forma de calor, esto debido al alto poder calorífico de estos materiales, debido a su naturaleza como producto derivado del petróleo crudo (Al-Salem et al., 2017).

Pirólisis

La pirólisis de residuos plásticos es un proceso de descomposición química de la materia orgánica, causada por el calentamiento a 400- 800 °C en ausencia de oxígeno, presión atmosférica con el uso de varios catalizadores. (Zhao et al., 2021). Los productos obtenidos van a depender de las propiedades que tengan las materias primas (residuos plásticos), dentro de los cuales encontramos el gas que puede representar del 2 al 47 %, el biocarbón 0 a 16 % y el bioaceite 31 a 91 %. (Figura. 3)

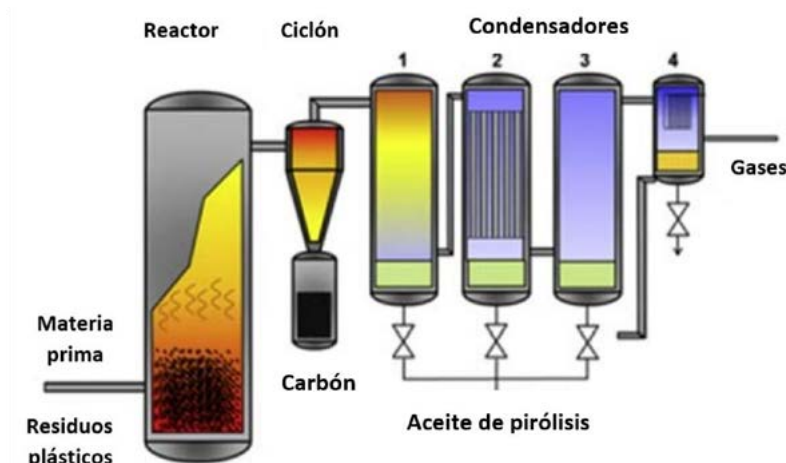


Figura 3. Pasos operativos en la pirólisis de residuos plásticos.
Fuente: Letcher et al., 2020.

Existen dos tipos de pirólisis de acuerdo a la temperatura y condiciones del proceso: pirólisis térmica y pirólisis catalítica.

Pirólisis térmica

Los productos obtenidos del proceso de pirólisis térmica al utilizar residuos plásticos (RSU) son: PP 48.8 % aceite, 1.6 % residuos y gases 49.6 %; PS 71 % aceite, 27 % residuos y 2 % gases; PVC 12.79 % aceite. (Buekens et al., 1998; Miranda et al., 2001; Williams et al., 2007; Letcher et al., 2020).

Pirólisis catalítica

La pirolisis catalítica utiliza catalizadores químicos que ayudan a disminuir la temperatura y el tiempo de retención, la cual la diferencia de la pirólisis térmica, puede llegar a convertir entre el 70 % y el 80 % de los residuos plásticos en aceite líquido de mayor calidad, similar al diésel convencional (Zhao et al., 20221).

Ventajas y desventajas

El aceite obtenido a partir del proceso de la pirólisis catalítica puede ser utilizado como energía, combustible y para generar electricidad. Así mismo, los subproductos como el carbón y gases pueden ser aprovechados. En contraste, el aceite líquido obtenido de la pirólisis térmica es de baja calidad y requiere una temperatura y un tiempo de retención altos (Zhao et al., 2021). Las desventajas de la pirólisis catalítica son dos: los costos de los catalizadores y que su reutilización es menor; por lo tanto, se buscan nuevas opciones de catalizadores que garanticen bajos costos del proceso y así aprovechar mejor esta tecnología (Zhao et al., 2021). (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de pirólisis y sus características

Fuente: Elaboración propia con datos de Letcher et al., 2020.

Térmica	Catalítica
Mayor temperatura craqueo	Menor temperatura craqueo
Tiempos de retención largos	Tiempos de retención cortos
Aceites obtenidos de menor calidad	Mayor velocidad de reacción, producción y calidad de aceites obtenidos
	Mejor selectividad
	Utiliza catalizadores

Pirólisis de polímeros plásticos

Los residuos plásticos que por su poder calorífico (CV) coinciden con los combustibles convencionales como la gasolina, diésel y queroseno, etc., pueden ser utilizados como material de partida para producir energía eléctrica, vapor y calor. (Letcher et al., 2020). Mostrando en la siguiente tabla algunos de los principales plásticos y su poder calorífico superior (HHV, por sus siglas en inglés “High heating value”) (Tabla. 2).

Tabla 2. Poder calorífico superior (HHV) de plásticos

Fuente: Al-Salem et al., 2017.

Plástico	HHV (MJ/kg)	Combustibles con- vencionales	HHV (MJ/kg)
HDPE	46.4-49.4	Gasolina premium	44.5
LDPE	46.4	Gasolina magna	43.4
PP	46.4	Etanol	27
PET	30.2		
PS	41.9		

Dado que las diferentes alternativas químicas para aprovechar los residuos plásticos no son suficientes, se deben seguir buscando estrategias para su eliminación, siendo una de ellas la bioconversión a productos de interés comercial o industrial.

Bioconversión de plástico a otros productos de interés industrial

La bioconversión implica la transformación de un compuesto químico a uno de mayor interés industrial, por la acción de microorganismos o sus enzimas. Se pueden utilizar como materia de partida desechos plásticos para producir estos compuestos; con ello, contribuir a disminuir la contaminación plástica y utilizar estas resinas para la síntesis de nuevos compuestos. (Qi et al., 2021). A continuación, se presentan ejemplos de bioconversión de algunos de los principales plásticos.

A) Bioconversión de PET

Producción y bioconversión de etilenglicol (EG) y el ácido tereftálico (TPA): Una alternativa distinta a la obtención de energía a partir de residuos plásticos de tereftalato de polietileno (PET), es la bioconversión, donde se obtienen productos de las degradaciones parciales de plásticos como el etilenglicol (EG) y el ácido tereftálico (TPA), productos químicos de alto valor (Qi et al., 2021). (Figura. 4).

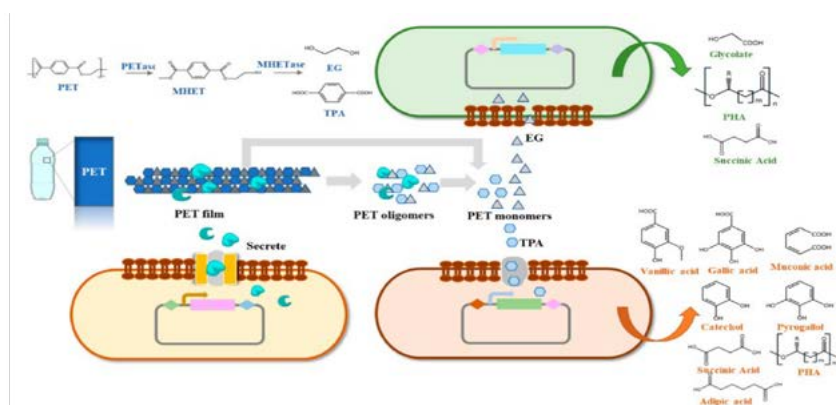


Figura 4. Conversión de PET. Fuente: Qi et al., 2021.
Fuente: Qi et al., 2021.

Etilenglicol (EG)

El EG es utilizado para producir ácido glicólico, un compuesto usado en la industria cosmética (Kraeling et al., 1996). La biotransformación de este compuesto es realizada por bacterias como *Gluconobacter oxydans* DSM2003 y *Burkholderia* sp. 6G13 (Wei et al., 2009a; Gao et al., 2014). Así mismo, se ha reportado la obtención de ácido glicólico a partir de muestras de residuo de PET hidrolizado con la cepa *G. oxydans* KCCM40109 y etilenglicol grado reactivo (Wei et al., 2009b; Kim et al., 2019).

Ácido Tereftálico (TPA)

Kim et al. (2019) reportó la obtención de protocatecuato (PCA) a partir de TPA. PCA es un importante precursor en la biosíntesis de compuestos químicos, con el uso de ingeniería genética. De esta manera a partir de PCA y una expresión heteróloga adicional de diferentes enzimas, se pueden producir ácido gálico (GA), pirogalol, catecol, ácido mucónico y vanílico.

Ácido gálico (GA)

Se ha utilizado protocatecuato (PCA), como sustrato, para producir ácido gálico con la enzima p-hidroxibenzoato hidroxilasa PobA de *Pseudomonas aeruginosa* (Chen et al., 2017), de igual manera Kim et al., 2019, expresó PobA de *P. putida* KT2440 en *E. coli* HBH-1 produciendo 1.4 mM de GA.

Pirogalol

Para la producción de pirogalol se pueden utilizar dos vías, la primera a partir de una descarboxilación de GA por una hidroxilación de PCA y la segunda vía por la hidroxilación del catecol sintetizado por la descarboxilación de PCA (Kambourakis et al., 2000; Jiménez et al., 2013; Wang et al., 2018; Kim et al., 2019).

Ácido mucónico (MA)

A partir de catecol se puede producir ácido mucónico, un compuesto utilizado para producir ácido adípico, utilizado en la fabricación de plásticos. Este compuesto puede ser sintetizado a través de la bioconversión mediante la escisión de su anillo por la enzima catecol 1,2 dioxigenasa CatA de *P. putida* KT2440 (Polen et al., 2012; Han et al., 2015; Johnson et al., 2016). Kim et al., 2019 expresó en la cepa MA-1 los genes para bioconvertir TPA a catecol (TphAabc, TphB y AroY) y CatA, obteniendo 2.7 mM de ácido mucónico a partir de 3.2 mM de TPA.

Ácido vanílico (VA)

La bioconversión de PCA a ácido vanílico (VA) se puede llevar a cabo por la enzima O-metiltransferasa (OMT) utilizando S-adenosil metionina (SAM) como cosustrato (Cantoni et al., 1953; Hocking et al., 1997; Li et al., 1998; Kunjapur et al., 2016). Se realizó la expresión de VA-2a en *E. coli* y se obtuvieron 0.3 mM de VA a partir de 3.4 mM de TPA. (Kim et al., 2019).

Producción de Polihidroxialcanoatos

Los polihidroxialcanoatos (PHA) son poliésteres biodegradables y biocompatibles sintetizados por diferentes microorganismos. (Wang et al., 2014). Algunas bacterias como *Pseudomonas putida* GP16 y *Pseudomonas putida* GO19, pueden producir PHA a partir de PET, obteniendo 8.4 mg/L por hora, durante 12 horas. Así mismo, pueden sintetizar compuestos biosurfactantes como los rammolípidos (Abdel-Mawgoud et al., 2014).

En cuanto a la bioconversión de PET a PHA; Fujiwara et al. (2021) reportaron la producción de PHA a partir de PET utilizando la cepa de *Ideonella sakaiensis* 201-F6, la principal fuente de carbono eran gránulos de PET en un medio mínimo. Por otro lado, Kenny et al. (2008) aislaron tres diferentes especies de *Pseudomona* y evaluaron su capacidad para utilizar TPA como fuente de carbono y obtener polihidroxialcanoatos, encontrando que la cepa denominada como *Pseudomona putida* GO16 fue la más eficiente convirtiendo 4.2 g/L de TPA a 0.25 g/L de PHA. Así mismo, Kenny et al. (2012), utilizaron *Pseudomona putida* GO16 para la producción de PHA de cadenas cortas utilizando como sustrato TPA y glicerol residual del biodiesel. Narancic et al. (2021) analizaron el genoma de la cepa *Pseudomonas umsongensis* GO16 y encontraron que tiene la capacidad de utilizar el TPA para la producción de PHA.

También se ha reportado la producción de polihidroxibutirato (PHB) a partir de tereftalato de bis(2-hidroxietil) (BHET) por Liu et al., (2021), donde se degradaron 5.16 g/L de BHET y se produjeron 3.66 % Polihidroxibutirato (PHB) utilizando un cocultivo con microorganismos recombinantes.

Producción de β -cetoadípatico (β KA)

El ácido β -cetoadípatico es utilizado en la producción de nailon, debido a sus resinas y fibras (Peña-Nuñez, 2016). Este compuesto se puede obtener por la bioconversión de PET a ácido β -cetoadípatico por la bacteria *Pseudomonas putida* KY2440 utilizando 4 esfuerzos secuenciales de ingeniería metabólica. Logrando en este último la producción de 15.1 g / L β KA a partir de BHET al 76 % como lo indica Werner et al., 2021. El ácido β -cetoadípatico también puede ser utilizado en la elaboración de un copoliéster alifático -aromático biodegradable como el poli(butilén adipato-co-tereftalato) (PBAT) (Armas-Pacheco, 2014).

B) Conversión de polietileno (PE)

En el caso de la bioconversión de este polímero, se ha reportado el uso intermedio de la pirólisis. El polietileno posconsumo puede ser utilizado para la producción de plásticos biodegradables, como lo refiere Guzik et al. (2014), el cual obtuvo un 25 % del peso seco celular de PHA por la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* PAO-1, a partir del crecimiento con un complejo de parafinas C8-C32 obtenidas de un proceso de pirólisis con el polietileno.

Se ha utilizado también a *Cupriavidus necator* H16 para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de cera de PE no oxigenada (N-PEW), obtenida previamente de un proceso de pirólisis de polietileno (Johnston et al., 2017).

C) Conversión de Polipropileno (PP)

Utilizando como materia de partida desechos plásticos y con un proceso intermedio de pirólisis térmica, se ha reportado la obtención de propano, el cual, junto con aditivos como el nitruro de bromo y dióxido de silicio a altas temperaturas, genera diferentes compuestos entre los que se encuentran el óxido de propileno, CO₂ y propileno. Estos compuestos se pueden utilizar como sustrato para el crecimiento de diferentes microorganismos, como la levadura *Yarrowia lipolytica*, y de esta manera obtener productos interés industrial como lo son ácidos grasos (Figura 5). (Mihreteab et al., 2019; 2020; Kube et al., 2022).

Otro ejemplo, es la identificación mediante espectrometría de masas de diversos polihidroxialcanoatos (PHA) como 3-hidroxibutirato, 3-hidroxivalerato y 3-hidroxihexanoato; además de PHB, después de la bioconversión de residuos de polipropileno (PP) como fuente adicional de carbono utilizando la bacteria *Cupriavidus necator* H16

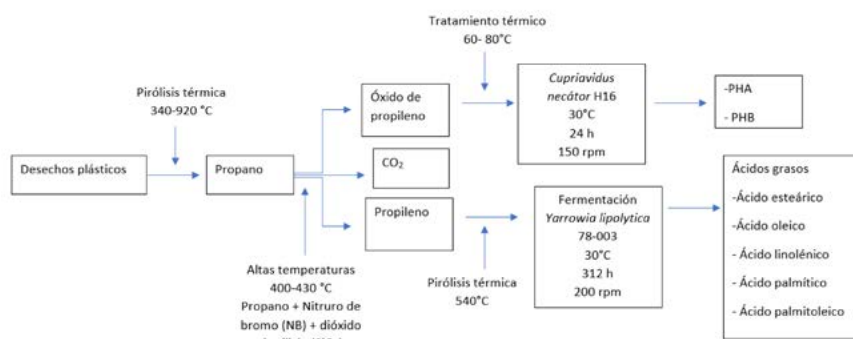


Figura 5. Bioconversión de polipropileno (PP).

Fuente: Elaboración propia (Johnston et al., 2019).

Conclusión

Se ha demostrado que los métodos de obtención de energía a partir de residuos plásticos como la pirólisis térmica y catalítica pueden ser efectivos en la recuperación de energía térmica y aceites de buena calidad, y estos pueden ser aprovechados en los procesos industriales, debido a su HHV similar a los combustibles convencionales. Sin embargo, una alternativa emergente para disminuir y aprovechar los residuos plásticos es la bioconversión, en la cual a partir de diferentes plásticos como el tereftalato de polietileno (PET), polietileno (PE) o el polipropileno (PP), se pueden obtener diferentes moléculas de interés industrial a través de la acción de microorganismos como bacterias o levaduras y sus enzimas. De esta manera, la bioconversión de plásticos, permite el aprovechamiento de sus residuos disminuyendo el impacto al medioambiente y, su revalorización reduce el consumo de resinas plásticas vírgenes e insumos que son utilizados en su extracción, transporte y procesamiento, por lo cual son alternativas emergentes convenientes al reciclaje convencional.

Referencias

- Abdel-Mawgoud, A. M., Lépine, F., & Déziel, E. (2014). A Stereospecific Pathway Diverts β -Oxidation Intermediates to the Biosynthesis of Rhamnolipid Biosurfactants. *Chemistry & Biology*, 21(1), 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2013.11.010>
- Acuerdo Nacional para la Nueva Economía del Plástico en México, 2do informe. Diciembre 2021. <https://aniq.org.mx/webpublico/Notas/Nota.asp?id=32#:~:text=Home-,ANIQ%20SE%20SUMA%20AL%20ACUERDO%20NACIONAL%20POR%20LA%20NUEVA%20ECONOM%C3%8DA,9dic.&text=Se%20comprometen%20a%20acopiar%20el,%25%2C%20respectivamente%2C%20al%202030>
- Al-Salem, S., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal Of Environmental Management*, 197, 177-198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- Armas Pacheco, F. A. (2014). *Síntesis de poliésteres biodegradables derivados del ácido tereftálico y ácido adípico con 1, 4-butanodiol* [Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela]. <http://hdl.handle.net/10872/12650>
- Ball, G. L., McLellan, C. J., & Bhat, V. S. (2011). Toxicological review and oral risk assessment of terephthalic acid (TPA) and its esters: A category approach. *Critical Reviews In Toxicology*, 42(1), 28-67. <https://doi.org/10.3109/10408444.2011.623149>
- Buekens, AG y Huang, H. (1998). Catalytic plastics cracking for recovery of gasoline-range hydrocarbons from municipal plastic wastes. *Resources Conservation and Recycling*, 23(3), 163-181.
- Cantoni, GL (1953). S-adenosilmetionina, un nuevo intermedio formado enzimáticamente a partir de L-metionina y adenosintrifosfato. *Revista de Química Biológica*, 204 (1), 403-416.
- Castro-Solano, B.A., Peña-Montes, C., Valerio-Alfaro, G., Peralta-Pelaez, L.A., Sánchez, L.E. (2020). Mineralización de poliésteres contenidos en residuos plásticos. En Navarrete, F.E. (Ed.), *La Eficiencia de las Energías Renovables en México* (pp 111-126). Ave editorial.
- Chen, Z., Shen, X., Wang, J., Wang, J., Yuan, Q., & Yan, Y. (2017). Ra-

- tional engineering of p-hydroxybenzoate hydroxylase to enable efficient gallic acid synthesis via a novel artificial biosynthetic pathway. *Biotechnology and Bioengineering*, 114(11), 2571-2580. <https://doi.org/10.1002/bit.26364>
- Cui, L., Shi, Y., Dai, G., Pan, H., Chen, J., Song, L., Wang, S., Chang, H. C., Sheng, H., & Wang, X. (2005). Modification of N-Methyl-N-Nitrosourea initiated bladder carcinogenesis in Wistar rats by terephthalic acid. *Toxicology And Applied Pharmacology*, 210(1-2), 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2005.06.008>
- Fujiwara, R., Sanuki, R., Ajiro, H., Fukui, T., & Yoshida, S. (2021). Direct fermentative conversion of poly(ethylene terephthalate) into poly(hydroxyalkanoate) by *Ideonella sakaiensis*. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99528-x>
- Gao, X., Ma, Z., Yang, L., & Ma, J. (2014). Enhanced Bioconversion of Ethylene Glycol to Glycolic Acid by a Newly Isolated Burkholderia sp. EG13. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 174(4), 1572-1580. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1114-9>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Guzik, M. W., Kenny, S. T., Duane, G. F., Casey, E., Woods, T., Babu, R. P., Nikodinovic-Runic, J., Murray, M., & O'Connor, K. E. (2014). Conversion of post consumer polyethylene to the biodegradable polymer polyhydroxyalkanoate. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 98(9), 4223-4232. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5489-2>
- Han, L., Liu, P., Sun, J., Wu, Y., Zhang, Y., Chen, W., Lin, J., Wang, Q., & Ma, Y. (2015). Engineering catechol 1, 2-dioxygenase by design for improving the performance of the cis, cis-muconic acid synthetic pathway in *Escherichia coli*. *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep13435>
- Hocking, M. B. (1997). Vanillin: Synthetic Flavoring from Spent Sulfite Liquor. *Journal Of Chemical Education*, 74(9), 1055. <https://doi.org/10.1021/ed074p1055>
- Jiménez, N., Curiel, J. A., Reverón, I., De las Rivas, B., & Muñoz, R. (2013). Uncovering the *Lactobacillus plantarum* WCFS1 Gallate

- Decarboxylase Involved in Tannin Degradation. *Applied And Environmental Microbiology*, 79(14), 4253-4263. <https://doi.org/10.1128/aem.00840-13>
- Johnson, C. W., Salvachúa, D., Khanna, P., Smith, H., Peterson, D. J., & Beckham, G. T. (2016). Enhancing muconic acid production from glucose and lignin-derived aromatic compounds via increased protocatechuate decarboxylase activity. *Metabolic Engineering Communications*, 3, 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.meteno.2016.04.002>
- Johnston, B., Jiang, G., Hill, D., Adamus, G., Kwiecień, I., Zięba, M., Sikorska, W., Green, M., Kowalczyk, M., & Radecka, I. (2017). The Molecular Level Characterization of Biodegradable Polymers Originated from Polyethylene Using Non-Oxygenated Polyethylene Wax as a Carbon Source for Polyhydroxyalkanoate Production. *Bioengineering*, 4(3), 73. <https://doi.org/10.3390/bioengineering4030073>
- Johnston, B., Radecka, I., Chiellini, E., Barsi, D., Ilieva, V. I., Sikorska, W., Musioł, M., Zięba, M., Chaber, P., Marek, A. A., Mendrek, B., Eke-re, A. I., Adamus, G., & Kowalczyk, M. (2019). Mass Spectrometry Reveals Molecular Structure of Polyhydroxyalkanoates Attained by Bioconversion of Oxidized Polypropylene Waste Fragments. *Polymers*, 11(10), 1580. <https://doi.org/10.3390/polym11101580>
- Kambourakis, S., Draths, K. M., & Frost, J. W. (2000). Synthesis of Gallic Acid and Pyrogallol from Glucose: Replacing Natural Product Isolation with Microbial Catalysis. *Journal Of The American Chemical Society*, 122(37), 9042-9043. <https://doi.org/10.1021/ja000853r>
- Kenny, S. T., Runic, J. N., Kaminsky, W., Woods, T., Babu, R. P., Keely, C. M., Blau, W., & O'Connor, K. E. (2008). Up-Cycling of PET (Polyethylene Terephthalate) to the Biodegradable Plastic PHA (Polyhydroxyalkanoate). *Environmental Science & Technology*, 42(20), 7696-7701. <https://doi.org/10.1021/es801010e>
- Kenny, S. T., Runic, J. N., Kaminsky, W., Woods, T., Babu, R. P., & O'Connor, K. E. (2012). Development of a bioprocess to convert PET derived terephthalic acid and biodiesel derived glycerol to medium chain length polyhydroxyalkanoate. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 95(3), 623-633. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4058-4>
- Kim, H. T., Kim, J. K., Cha, H. G., Kang, M. J., Lee, H. S., Khang, T. U., Yun, E. J., Lee, D., Song, B. K., Park, S. J., Joo, J. C., & Kim, K.

- H. (2019). Biological Valorization of Poly(ethylene terephthalate) Monomers for Upcycling Waste PET. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(24), 19396-19406. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03908>
- Kraeling, MEK y Bronaugh, RL (1996). *In vitro percutaneous absorption of an alpha hydroxy acid(glycolic acid) in human skin*. Article Information | J-GLOBAL. https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=200902130175601310
- Kube, P., Dong, J., Bastardo, N. S., Ruland, H., Schlögl, R., Margraf, J. T., Reuter, K., & Trunschke, A. (2022). Green synthesis of propylene oxide directly from propane. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34967-2>
- Kunjapur, A. M., Hyun, J. C., & Prather, K. L. J. (2016). Deregulation of S-adenosylmethionine biosynthesis and regeneration improves methylation in the E. coli de novo vanillin biosynthesis pathway. *Microbial Cell Factories*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0459-x>
- Letcher, T. (2020). *Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions*. Academic Press.
- Li, Z., Zhang, C., Wang, K., & Gu, L. (1999). Changes in the pulmonary function of factory workers exposure to terephthalic acid. *Wei Sheng Yan Jiu*, 28(1), 1-3. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12712733>
- Li, K., & Frost, J. W. (1998). Synthesis of Vanillin from Glucose. *Journal Of The American Chemical Society*, 120(40), 10545-10546. <https://doi.org/10.1021/ja9817747>
- Liu, P., Zhang, T., Zheng, Y., Li, Q., Su, T., & Qi, Q. (2021). Potential one-step strategy for PET degradation and PHB biosynthesis through co-cultivation of two engineered microorganisms. *Engineering Microbiology*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2021.100003>
- Luciani-Torres, M. G., Moore, D. H., Goodson, W. H., & Dairkee, S. H. (2014). Exposure to the polyester PET precursor—terephthalic acid induces and perpetuates DNA damage-harboring non-malignant human breast cells. *Carcinogenesis*, 36(1), 168-176. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgu234>
- McKeen, L. W. (2013). Introduction to Plastics and Polymers Compositions. En *Elsevier eBooks* (pp. 1-16). <https://doi.org/10.1016/b978-1-4557-2851-0.00001-3>

- Mihreteab, M., Stubblefield, B. A., & Gilbert, E. S. (2019). Microbial bioconversion of thermally depolymerized polypropylene by *Yarrowia lipolytica* for fatty acid production. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 103(18), 7729-7740. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09999-2>
- Miranda, R., Yang, J., Roy, C., & Vasile, C. (2001). Vacuum pyrolysis of commingled plastics containing PVC I. Kinetic study. *Polymer Degradation And Stability*, 72(3), 469-491. [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(01\)00048](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(01)00048)
- Narancic, T., Salvador, M., Hughes, G. M., Beagan, N., Abdulmutalib, U., Kenny, S. T., Wu, H., Saccomanno, M., Um, J., O'Connor, K. E., & Jiménez, J. I. (2021). Genome analysis of the metabolically versatile *Pseudomonas umsongensis* GO16: the genetic basis for PET monomer upcycling into polyhydroxyalkanoates. *Microbial Biotechnology*, 14(6), 2463-2480. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13712>
- Peña Núñez, Álvaro (2016). *Estudio tecno-económico del bioproceso de producción de ácido adípico*. [Tesis Fin de Grado, E.T.S.I. Industriales (UPM)]. <https://oa.upm.es/43961/>
- Polen, T., Spelberg, M., & Bott, M. (2012). Toward biotechnological production of adipic acid and precursors from biorenewables. *Journal Of Biotechnology*, 167(2), 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.07.008>
- Plastics Europe. (2021). *Plastics - the Facts 2021 • Plastics Europe*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>
- Plastics Europe. (2023). *Plastics – the fast Facts 2023 • Plastics Europe*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>
- Qi, X., Yan, W., Cao, Z., Ding, M., & Yuan, Y. (2021). Current Advances in the Biodegradation and Bioconversion of Polyethylene Terephthalate. *Microorganisms*, 10(1), 39. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10010039>
- Shi, Y., Cui, L., Dai, G., Chen, J., Pan, H., Song, L., Cheng, S., & Wang, X. (2006). Elevated prostaglandin E2 level via cPLA2–COX-2–mPGES-1 pathway involved in bladder carcinogenesis induced by terephthalic acid-calculi in Wistar rats. *Prostaglandins Leukotrienes And Essential Fatty Acids*, 74(5), 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.plefa.2006.02.005>

- Wang, J., Shen, X., Wang, J., Yang, Y., Yuan, Q., & Yan, Y. (2018). Exploring the Promiscuity of Phenol Hydroxylase from *Pseudomonas stutzeri* OX1 for the Biosynthesis of Phenolic Compounds. *ACS Synthetic Biology*, 7(5), 1238-1243. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.8b00067>
- Wang, Y., Yin, J., & Chen, G. (2014). Polyhydroxyalkanoates, challenges and opportunities. *Current Opinion In Biotechnology*, 30, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.06.001>
- Wei, G., Yang, X., Gan, T., Zhou, W., Lin, J., & Wei, D. (2009a). High cell density fermentation of *Gluconobacter oxydans* DSM 2003 for glycolic acid production. *Journal Of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 36(8), 1029-1034. <https://doi.org/10.1007/s10295-009-0584-1>
- Wei, G., Yang, X., Zhou, W., Lin, J., & Wei, D. (2009). Adsorptive bioconversion of ethylene glycol to glycolic acid by *Gluconobacter oxydans* DSM 2003. *Biochemical Engineering Journal*, 47(1-3), 127-131. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.07.016>
- Werner, A. Z., Clare, R., Mand, T. D., Pardo, I., Ramirez, K. J., Haugen, S. J., Bratti, F., Dexter, G. N., Elmore, J. R., Huenemann, J. D., Peabody, G. L., Johnson, C. W., Rorrer, N. A., Salvachúa, D., Guss, A. M., & Beckham, G. T. (2021). Tandem chemical deconstruction and biological upcycling of poly(ethylene terephthalate) to β -ketoadipic acid by *Pseudomonas putida* KT2440. *Metabolic Engineering*, 67, 250-261. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.07.005>
- Williams, P. T., & Slaney, E. (2007). Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. *Resources Conservation And Recycling*, 51(4), 754-769. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.002>
- Zhao, X., Korey, M., Li, K., Copenhaver, K., Tekinalp, H., Celik, S., Kalaitzidou, K., Ruan, R., Ragauskas, A. J., & Ozcan, S. (2021). Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 428, 131928. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131928>

Capítulo 12

Diodos orgánicos emisores de luz (Oled) basados en el polímero conductor Poli(3,4- Etilendioxitiofeno) (PEDOT)

María de los Ángeles Vargas Hernández¹

maria_vargas@tese.edu.mx

María de la Luz Delgadillo Torres¹

ldelgadillo@tese.edu.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20252069>



¹ Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

Resumen

La electricidad es un factor fundamental en muchas actividades cotidianas, lo que exige una investigación continua para crear nuevas técnicas o procesos mejorados para la generación de energía eléctrica. El aumento del consumo eléctrico mundial implica un costo ambiental por el aumento de las emisiones de dióxido de carbono provenientes de diversas fuentes. El enfoque global actual en la investigación energética se centra en la reducción del consumo de energía y la minimización de las emisiones de dióxido de carbono. Estos objetivos se logran generalmente mediante el uso de fuentes de energía renovables y el desarrollo de estrategias de gestión energética eficiente. Los avances recientes en la ciencia de los materiales y la rápida evolución de los diodos orgánicos emisores de luz (OLED), que poseen ventajas como bajo consumo de energía, peso ligero, amplia gama de colores y bajo precio, son considerados como dispositivos de iluminación y visualización de la próxima generación con una gama amplia de aplicaciones. Los OLED basados en polímeros conductores son flexibles, con bajo costo, fáciles de fabricar, livianos, etc. Los polímeros conductores como el poli(3,4-etilen dioxitiofeno) mezclado con nanocompuestos son utilizados como componentes orgánicos activos en estos dispositivos. La forma del dispositivo OLED y los materiales utilizados en las capas activas afectan significativamente el rendimiento del material. Este trabajo tiene como objetivo principal presentar los avances recientes de los diodos orgánicos emisores de luz (OLED) basados en el polímero conductor PEDOT, considerando los desafíos y las limitaciones de las tecnologías de iluminación y visualización sostenibles.

Introducción

Actualmente, el sector energético mundial está rodeado de una incertidumbre significativa, a corto y a largo plazo. Con recursos energéticos cada vez más escasos y crecientes problemas de sostenibilidad, se sabe que el aumento del consumo energético tiene un costo ambiental. Es necesario la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y otros factores diversos que obligan a buscar nuevas estrategias energéticas innovadoras y ecológicas. En concreto, las emisiones de CO₂ procedentes del uso de energía, los procesos industriales, la quema de gas, medidas en términos de dióxido de carbono equivalente experimentaron un aumento del 0.8 % en 2022, alcanzando la asombrosa cifra de 39,3 gigatoneladas (GT) (Imán, et al., 2024). Además, se espera que el consumo mundial de energía aumente un 28 % para 2040 tomando como referencia 2015. El objetivo es que el 50 % de la electricidad provenga de fuentes renovables para 2030 (Imán et al., 2024).

Los dispositivos optoelectrónicos flexibles y transparentes son sistemas electrónicos mecánicamente deformables y elásticos con tecnología clave para la generación eléctrica futura. Estos dispositivos optoelectrónicos orgánicos tienen una ventaja sobre los dispositivos electrónicos inorgánicos convencionales en el sentido de que pueden construirse sobre sustratos transparentes y elásticos, que proporcionan una mayor flexibilidad mecánica y larga vida útil bajo varios ciclos de deformación (Ravikumar y Dangate, 2024).

Los trabajos de investigación para producir OLED con alto rendimiento en términos de luminancia, eficiencia, espectro de color y estabilidad del dispositivo, fabricación barata se enfocan en dos direcciones: 1) Diseño y síntesis de pequeñas moléculas orgánicas y polímeros que presenten mayor eficiencia cuántica en estado sólido. El énfasis es sobre el mecanismo de emisión de luz que recolecten excitones singulete y triplete con mayor eficiencia. 2) Obtener mejores diseños del dispositivo con materiales nuevos que permitan bajo voltaje de activación, elevada pureza del color y buena eficiencia (Gupta et al., 2024).

Las investigaciones en el campo de los materiales poliméricos han contribuido mucho al desarrollo de la electrónica orgánica, especialmente

en la producción de diodos orgánicos emisores de luz (OLED). Los polímeros conductores (CPs) son materiales orgánicos con características eléctricas/ópticas, al igual que los semiconductores inorgánicos y los metales (Ding et al., 2024). Además, presentan algunas características excepcionales como propiedades eléctricas ajustables, alta estabilidad física/química, facilidad de síntesis, versatilidad, ligeros, resistentes a la corrosión y son económicos. A pesar de las diversas ventajas, existen algunas deficiencias, como la baja solubilidad en todos los disolventes orgánicos comúnmente utilizados y la no degradabilidad (Ding et al., 2024). Los CPs comúnmente aplicados en la industria electrónica son: poliacetileno (PA), polianilina (PANI), polipirrol (PPy), poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT), poli(p-fenileno) (PPP), poli(p-fenilenvinileno) (PPV), poli(orto aminofenol) (POAP) y varios derivados de politiofeno (PT) (Ding et al., 2024; Vipu Vinayak et al., 2024). El poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT) tiene una especial atención en este sector debido a su conductividad y estabilidad excepcional, especialmente para la fabricación de diodos orgánicos emisores de luz (OLED) (Zhu et al., 2024). Para superar las limitaciones que presentan los CPs en términos de su solubilidad, conductividad y estabilidad, se están modificando o mezclando con diversos nanomateriales. Estos nanocompuestos basados en CPs (CPN) constituyen un tipo distinto de materiales poliméricos avanzados (Vipu Vinayak et al., 2024).

Este trabajo presenta una breve revisión enfatizando el uso de los CP, especialmente el polímero poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT) en la fabricación de diodos orgánicos emisores de luz (OLED). Se abordan aspectos como características del polímero conductor, el papel fundamental que desempeñan en la evolución de los OLED, destacando su importancia en una solución ecológica de iluminación y visualización, cuya tecnología allanan el camino para futuros avances en el campo de la energía.

Antecedentes

En 1953, Bernanose et al. observaron por primera vez la emisión de luz de una película de celulosa orgánica dopada con naranja de acridina (Mandal et al., 2024). Posteriormente, Pope et al. observaron la emisión

de luz de un solo cristal orgánico de antraceno inducida por inyección de un portador en un campo eléctrico alto (Ungur, 2018). En 1987, investigadores de Cambridge emplearon polímeros conjugados para la producción de luz (AlSalhi et al., 2011). El primer OLED basado en polímeros presentaba una eficiencia cuántica externa (EQE) del 0.05 % a un voltaje impulsado de 15 V, mientras que Kim et al. obtuvieron un OLED fluorescente verde con un 30 % de EQE (Mandal et al., 2024).

Por otra parte, Tang y VanSlyke informaron sobre los primeros diodos orgánicos emisores de luz (OLED) de primera generación basados en un emisor de fluorescencia (Gupta et al., 2024; Li et al., 2024). De acuerdo al proceso de emisión observado, se pueden dividir los emisores en primera, segunda y tercera generación, respectivamente (Yakimanskiy et al., 2024).

En los trabajos recientes se ha logrado aumentar la vida útil operativa de los OLED que emiten luz verde y roja, alcanzando un máximo de LT95 a 1000 cd/m² en los dispositivos de luz roja y verde comercializados, los cuales han superado las 20 000 h. Sin embargo, el dispositivo de luz azul tiene una vida útil muy corta de solo 450 h, requiere de una densidad de corriente mayor para alcanzar una emisión azul eficiente con una luminancia similar en intensidad que sus contrapartes verde y roja. En la mayoría de los casos, la corriente no se puede convertir completamente en luz y esta se disipa en forma de calor. Se ha confirmado que el calor y la corriente pueden causar la descomposición del compuesto orgánico (Gupta et al., 2024).

Fundamento teórico de los diodos orgánicos emisores de luz (OLED)

Dispositivos optoelectrónicos orgánicos

Las tecnologías optoelectrónicas como los diodos emisores de luz (LED), la energía fotovoltaica y el láser se han utilizado ampliamente en muchas áreas de la vida moderna, como la electrónica de consumo, la telefonía y la iluminación de estado sólido (Ravikumar et al., 2024). Debido a las propiedades únicas que distinguen a los semiconductores orgánicos (OSC)

de sus contrapartes inorgánicas, los OSC se han estudiado y empleado ampliamente en varios dispositivos eléctricos desde su inicio. Casi todos los dispositivos orgánicos son dispositivos multicapa de película delgada, como los fotovoltaicos orgánicos (OPV) y los diodos orgánicos emisores de luz (OLED), que emplean capas orgánicas como capas funcionales y capas metálicas como electrodos. Por lo tanto, las interfaces entre los materiales orgánicos y el metal son esenciales para mejorar el rendimiento del dispositivo. Las pantallas OLED de matriz activa de Samsung para teléfonos inteligentes y el televisor OLED de 55 pulgadas de LG son dos ejemplos de pantallas disponibles comercialmente que utilizan tecnología OLED. Otros productos electrónicos flexibles en el mercado son las pantallas flexibles YOUM de Samsung. Estos dispositivos permiten su extensión, compresión y el estiramiento, además de la flexión, por lo que son considerados como materiales elásticos (Ravikumar et al., 2024).

La resistencia laminar (R_s) de los TCE (electrodos de conducción transparentes) y la transmitancia óptica a 550 nm (T_{550}), definida como la longitud de onda en la que la sensibilidad del ojo humano es máxima, se utilizan para caracterizar y comparar las características de los dispositivos optoelectrónicos en general (Ravikumar et al., 2024). La baja resistencia laminar (R_s) de 5-40 Ohm/sq y la alta transmitancia óptica (T_{550}) del 90 % a 550 nm del óxido de indio y estaño (ITO) lo han convertido en una opción eficaz para el TCE estándar de la industria. Lamentablemente, debido al alto costo del indio, los costosos procesos de vacío y la fragilidad mecánica de las películas de ITO estándar no son adecuados para aplicaciones optoelectrónicas de nueva generación, como pantallas flexibles, celdas solares enrollables y dispositivos electrónicos portátiles (Ravikumar et al., 2024). La flexibilidad mecánica permite que las deformaciones como torsión, plegado, arrugamiento y estiramiento se apliquen de manera indiferente a cualquier superficie curva y permita un movimiento libre. Sin embargo, obtener simultáneamente alta flexibilidad mecánica, transparencia óptica, etc. Es una tarea desafiante.

Configuraciones de dispositivos OLED

La figura 1 se muestra la estructura de un dispositivo diodo orgánico emisor de luz (OLED). Los sustratos deben cumplir con algunas características como baja penetración de oxígeno y humedad, alta transparencia óptica, baja resistividad, baja rugosidad de superficie y elevada capacidad de flexión, entre otros. Actualmente, los OLED son más estables y presentan mayor rendimiento al insertar capas multifuncionales en comparación con un sistema OLED simple. Como se observa en la Figura 1, la estructura de los OLED tiene una estructura de película delgada multicapa; contiene dos electrodos (ánodo y cátodo), una capa de inyección de huecos (HIL), una capa de transporte de huecos (HTL), una capa de emisión (EML) y una capa de transporte de electrones (ETL). Estas capas desempeñan un papel fundamental en la reducción del efecto de extinción de excitones y mejoran la tasa de recombinación (Mandal et al., 2024; Yakimanskiy et al., 2024; Kim et al., 2024).

Originalmente, los OLED básicos de polímero consistían en una sola capa orgánica. Los OLED modernos incorporan una estructura simple de doble capa o bicapa que consiste en una capa de transporte de electrones (ETL) y una capa de transporte de huecos (HTL). Estas estructuras desarrolladas de OLED mejoran la eficiencia cuántica (Mandal et al., 2024).

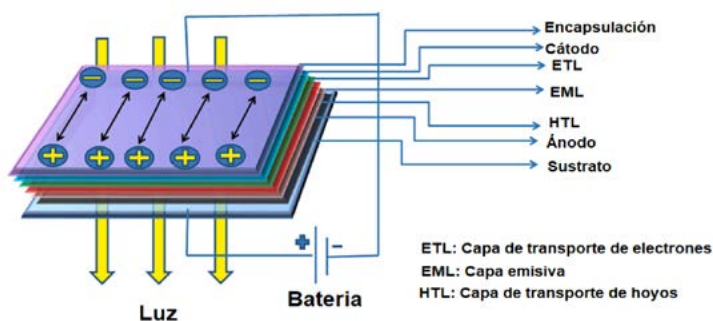


Figura 2. Esquema de una estructura multicapa OLED (Mandal et al., *Materials Science and Engineering B*, 2024)

Funcionamiento de los OLED

La electroluminiscencia es el principio de funcionamiento básico de los OLED, similar al LED. Se aplica una diferencia de potencial entre los dos electrodos en el momento de la operación. Los electrones se inyectan desde el cátodo en el LUMO (orbital molecular desocupado bajo) de la capa polimérica adyacente y los huecos en el nivel HOMO (orbital molecular ocupado alto), como se muestra en la Figura 3. Los electrones y huecos inyectados se combinan mediante fuerzas electrostáticas para formar un excitón cerca de la capa emisora, y se desintegran para producir luz (Mandal et al., 2024). “Cuando un átomo absorbe energía, ocurre una transición electrónica desde un estado fundamental a un estado excitado, generando una nueva configuración electrónica. Los electrones pueden acceder a orbitales moleculares desocupados de mayor energía, formando diversos estados excitados de acuerdo con las diferentes configuraciones posibles. Si los electrones toman la misma orientación del spin como en el estado fundamental, el spin resultante es cero y el estado excitado es llamado singulete. Si el spin tiene un valor total igual a uno, el estado excitado se denomina triplete. Cada estado singulete excitado (E1, E2, E3, etc.) presenta un estado triplete correspondiente (T1, T2, T3, etc.). Los estados tripletes ocasionan fosforescencia porque tardan más en llegar a su estado fundamental, y los singuletes ocasionan fluorescencia. Durante las transiciones electrónicas de los sistemas luminescentes, se crean pares de electrón-hueco, que constituyen excitaciones elementales denominadas excitones, asociadas a los estados singuletes y tripletes” (Cabriaes Gómez, 2004).

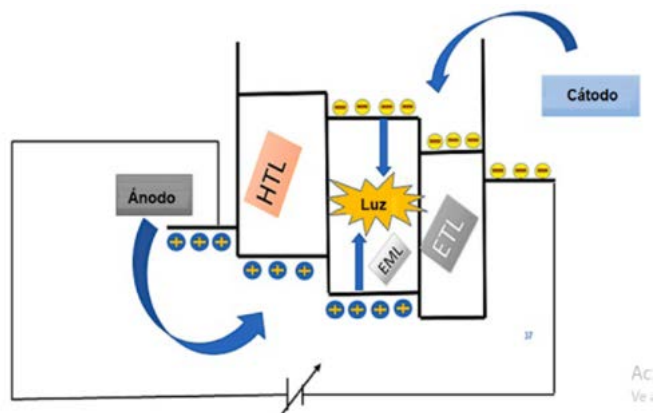


Figura 3. Diagrama del mecanismo de emisión de luz en los sistemas OLEDs (Mandal et al., Materials Science and Engineering B, 2024)

La excitación eléctrica genera excitones singlete y triplete en una proporción de 25 a 75. En el caso de la fluorescencia, solo se permite la transición emisiva de los excitones singlete al estado fundamental singlete ($S1 \rightarrow S0$) (Figura 4). Por lo tanto, se puede recolectar un máximo del 25 % del excitón. Como resultado, el límite superior de la eficiencia cuántica externa (EQE) de los OLED de primera generación que utilizan emisores fluorescentes convencionales es del 5 % sin desacoplamiento óptico adicional (Yakimanskiy et al., 2024).

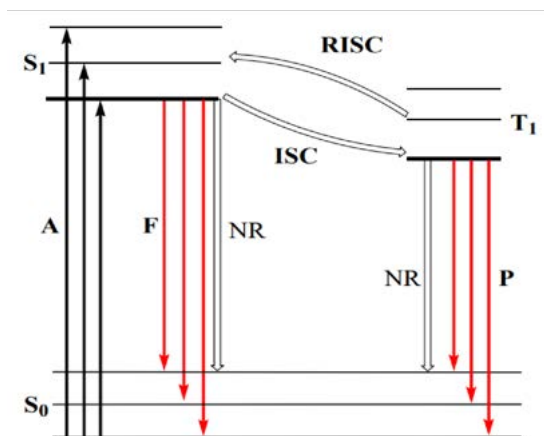


Figura 4. Diagrama de Jablonski (A-absorción, F-fluorescencia, P-fosforescencia, NR-desintegración no radiativa, ISC-cruce intersistemas, RISC-cruce intersistemas inverso) (Yakimanskiy et al. Focus Article, Mendelevov Communication, 2024)

En los últimos años, se han desarrollado emisores de cuarta generación, basados en la fluorescencia retardada activada térmicamente por resonancia múltiple (MR-TADF). Los emisores TADF pueden recolectar excitones S_1 y T_1 a través de un proceso eficiente de cruce intersistema inverso (RISC) en virtud de una pequeña brecha de energía singlete-triplete (ΔE_{ST}), figura 4.

Cátodos

Los materiales utilizados para el cátodo en los OLED deben poseer una función de trabajo baja, un voltaje de umbral bajo y ser inyectores eficientes de electrones. Los materiales para los cátodos eficaces son: Ca, K y Li. Las aleaciones de metal como Mg-Ag y Al-Li, cátodos compuestos como Al-LiF o Al-CsF (Mandal et al., 2024).

Ánodos

Los materiales utilizados en los OLED como ánodos deben tener buena transparencia, buena conductividad, alta estabilidad química y alta función de trabajo. El óxido de indio y estaño (ITO) son los materiales para

el ánodo apropiados en dispositivos OLED. También se han utilizado el óxido de galio-indio (GIO), el óxido de galio-indio-estaño (GITO), el óxido de cinc-indio (ZIO) y el óxido de cinc-indio-estaño (ZITO), mostrando alta conductividad eléctrica, una transparencia óptica excepcional y una mejor función de trabajo comparada con la ITO comercial (Mandal et al., 2024).

Sustratos

Los sustratos desempeñan un papel esencial en el campo de los dispositivos optoelectrónicos, en particular en las aplicaciones de iluminación. Las propiedades ópticas son uno de los requisitos específicos y, en el caso de los OLED, debe ser un sustrato ópticamente transparente, sin asperezas y de baja rugosidad superficial. Además, el sustrato no debe liberar contaminantes y debe ser inerte a los compuestos químicos utilizados durante la preparación del OLED. Los materiales utilizados para el sustrato son: Poliimida (PI), poliéter-sulfona (PES), polietilennaftalato (PEN), tereftalato de polietileno (PET), policarbonato (PCC), entre otros (Mandal et al., 2024).

Capa de inyección de electrones (EIL)/capa de inyección de huecos (HIL)

La principal barrera que enfrentan los portadores de carga en las interfaces de inyección de carga es la caída de potencial a través de estas capas, por lo que la inyección de portadores de carga en ambos electrodos es crucial para los OLED de alta eficiencia. Dado que los OLED son dispositivos impulsados por la corriente, la caída del potencial resulta en las pérdidas de energía y eficiencia. En ese caso, EIL y HIL ayudan a equilibrar el nivel HOMO y LUMO de los semiconductores orgánicos con los electrodos, lo que resulta en portadores de carga altos y con recombinación (Mandal et al., 2024).

Capa emisiva (EML)

La capa emisiva donde ocurre el proceso de recombinación electrón-hueco comprende moléculas orgánicas o semiconductoras. Los electrones saltan del cátodo a la capa emisiva a través del ETL, mientras que los huecos saltan del ánodo a la capa emisiva por el HTL. La emisión de luz y el color dependen de la tasa de recombinación electrón-hueco y del voltaje aplicado. La recombinación electrón-hueco está determinada por el equilibrio entre los huecos y electrones en la capa emisora. La ventaja que tienen los materiales orgánicos sobre los materiales inorgánicos es su amplia gama de colores y su elevada eficiencia de fluorescencia. El color de la luz varía según la diferencia de energía entre los estados excitados y los estados moleculares fundamentales. Hay tres tipos de materiales emisores con alta eficiencia, elevada vida útil y pureza de color: las moléculas pequeñas, los polímeros conjugados y los dendrímeros. Los materiales emisores deben poseer características tanto de transporte de electrones como de transporte de huecos, es decir, naturaleza bipolar. Los tipos de materiales aceptores o donantes (A-D) y donantes-aceptores-donantes (D-A-D) para los materiales emisores de OLED son la triazina, el triazol, el oxadiazol, el benceno sustituido y el benzotiadiazol, los cuales se utilizan como unidadesceptoras, mientras que el carbazol, la arilamina, la fenotiazina y sus derivados son donantes para las estructuras bipolares de los OLED (Mandal et al., 2024).

Los portadores de carga de los electrones y huecos provienen del cátodo y del ánodo, respectivamente, aplicando un voltaje externo. Estos portadores de carga se inyectan a las capas de inyección de electrones y huecos. Los electrones y huecos migran a través de las capas de transporte de electrones y huecos hacia la capa emisiva (EML), donde se observa la recombinación de los portadores de carga y la formación de excitones. La electroluminiscencia (EL) se produce cuando estos excitones se relajan radiativamente desde el estado excitado al estado basal. El diseño de la capa emisiva es crucial para lograr una alta eficiencia en los dispositivos OLED (Yakimanskiy et al., 2024).

Capa de bloqueo de electrones (EBL)/capa de bloqueo de huecos (HBL)

A medida que los portadores de carga llegan a los electrodos opuestos, se agotan y ya no ayudan a la carga. La recombinación da como resultado la extinción de los portadores de carga y la reducción de la eficiencia del dispositivo. Por lo tanto, para evitar que los electrones y huecos lleguen a los electrodos opuestos, se introducen las capas EBL y HBL (Mandal et al., 2024).

Capa de transporte de electrones (ETL) / capa de transporte de huecos (HTL)

El propósito de las capas de transporte en los OLED es facilitar el flujo de portadores de carga a la capa emisiva desde sus respectivos electrodos. Dado que la movilidad de los electrones y huecos de los diferentes nanocompuestos orgánicos-inorgánicos son diferente, se necesita una inyección de carga para lograr el balance entre ellos. Los niveles del orbital molecular ocupado alto (HOMO) y orbital molecular desocupado bajo (LUMO) deben coincidir con respecto a la EML. La ETL o HTL deben tener mayor movilidad de electrones y huecos para aumentar el número de cargas (Mandal et al., 2024).

Materiales para la capa de transporte de huecos (HTL)

Los materiales para HTL son aquellos que aceptan portadores de huecos con carga positiva y los transportan. Por lo tanto, los materiales con bajos potenciales de ionización y bajas afinidades electrónicas son los seleccionados. En otras palabras, los materiales transportadores de carga son donadores de electrones que transportan los huecos y facilitan la inyección de los huecos desde el ánodo a la capa emisora. Además, estos materiales desempeñan el papel de bloqueador de electrones para que no escapen de la capa emisora en los OLED, alinean los niveles de energía con los de la EML, al tiempo que minimiza la recombinación de carga ((Mandal et al., 2024; Kim et al, 2024).

Los materiales HTL deben tener las siguientes características: (i) adecuada movilidad de huecos para asegurar un balance de carga uniforme, (ii) niveles de energía HOMO (orbital molecular ocupado alto) y LUMO (orbital molecular desocupado bajo) adecuados, (iii) estabilidad térmica y morfológica alta para minimizar cambios morfológicos no deseados durante la preparación de películas (Kim et al., 2024). Debido a estas características, el número de materiales adecuados para el procesamiento en solución de un HTL es muy limitado. Recientemente, se han estudiado semiconductores de polímeros conjugados con excelente solubilidad en disolventes orgánicos y propiedades excepcionales en las películas preparadas, sin embargo, la movilidad de los huecos en los polímeros es menor comparándolos con las moléculas pequeñas. Además, los polímeros exhiben una distribución de masa molecular amplia, que reducen el rendimiento del dispositivo, lo que hace que su comercialización sea más desafiante en comparación con las moléculas pequeñas (Kim et al., 2024).

Capa de transporte de electrones (ETL)

Así como la capa HTL, la capa de transporte de electrones (ETL) se utiliza para lograr una inyección, transporte y recombinación de electrones desde el cátodo metálico a la capa emisora en los OLED. Hay diferentes clases de ETL que mejoran el rendimiento de los dispositivos, por ejemplo, moléculas pequeñas y polímeros. La capa ETL desempeña un papel en el bloqueo de huecos, aceptación y transporte de electrones. Se han desarrollado muy pocos ETM (materiales de transporte de electrones) útiles con una movilidad de electrones superior. Los ETL más utilizado es el oxadiazol (Mandal et al., 2024).

Polímeros utilizados en OLED

Los diodos emisores de luz orgánicos poliméricos (POLED) son bastante eficientes y pueden mejorarse con la combinación apropiada del polímero y un diseño adecuado del dispositivo. Para aumentar la fotoluminiscencia y rendimiento cuántico (PLQY) del polímero emisor de luz (LEP), este se modifica, mientras que el diseño de los dispositivos se mejora al

añadir una capa fina polimérica entre HTL y el LEP. Esta capa adicional se conoce comúnmente como capa intermedia o capa de imprimación. El efecto neto es que las cargas de electrones y huecos se acumulan en la interfaz de la capa intermedia del LEP, lejos del ánodo o el cátodo. De esta manera, se puede obtener un equilibrio de carga dentro de los dispositivos, maximizando la formación de excitones (pares electrón-hueco en el estado excitado) y evitando la extinción de excitones por parte del cátodo o del ánodo.

Los principales polímeros utilizados en los OLED son: Polimetilmetacrilato (PMMA), Polifenileno (PPP), Polietilendioxitiofeno (PEDOT), Polivinilalcohol (PVA), Polianilina (PANI), Polifenilenvinileno (PPV), Polifluoreno (PFO), Politiofeno (PT); son ejemplos de polímeros conductores comunes que dependen de estructuras π -conjugadas, que tienen diversos grupos funcionales y elementos (Figura 5) (Ravikumar et al., 2024).

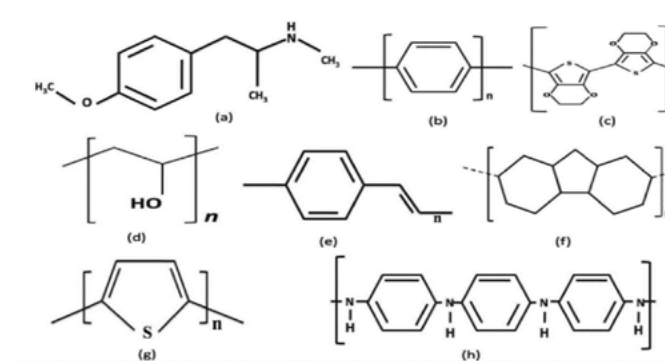


Figura 5. Estructuras de los polímeros (a) PMMA, (b) PPP, (c) PEDOT, (d) PVA, (e) PANI, (f) PPV, (g) PFO, (h) PTP

Los polímeros son moléculas grandes compuestas de múltiples unidades repetitivas conocidas como monómeros. Presentan propiedades macro y micro, incluidas características semiconductoras, ópticas y de transporte eléctrico. Estos polímeros ofrecen una gama de conductividad eléctrica que se puede lograr a través del dopaje, al tiempo que mantienen una excelente estabilidad térmica y flexibilidad mecánica. Los polímeros son bien conocidos por su amplio espectro de propiedades favorables, como

la resistencia mecánica y la viscoelasticidad (Kumar, 2024; Rayar, 2024). La presencia de enlaces simples y dobles alternados conjugados imparte sus características mecánicas. Las cadenas laterales unidas determinan la procesabilidad y solubilidad de los polímeros conductores (Thinley et al., 2023). Los polímeros conductores pueden existir tanto en estados localizados como deslocalizados, son parcialmente amorfos y cristalinos. La deslocalización de los enlaces depende en gran medida del desorden, que desempeña un papel crucial en la producción de portadores de carga como solitones, bipolarones, polarones y otras partículas responsables del cambio de una naturaleza aislante a metálica (Lima et al., 2024). En su estado prístino, la conductividad de los polímeros conjugados pasa de un comportamiento aislante a semiconductor y, esta conductividad aumenta con la concentración de dopantes. El enlace π en polímeros conjugados se autolocaliza para experimentar una excitación no lineal como polarones, bipolarones, solitones, etc. Tras el dopaje o la fotoexcitación, el polímero experimenta una transición de un régimen de excitación no lineal a un estado metálico (Lima et al., 2024). La movilidad de carga es crucial para determinar las características conductoras y ópticas de los polímeros. Los factores que determinan estas propiedades son el grado de cristalinidad y el nivel de conjugación (Liu et al, 2024).

Poli(3,4-etilen dioxitiofeno) (PEDOT)

Con estabilidad térmica y ambiental, el politiofeno y sus derivados son estudiados activamente por sus excelentes propiedades ópticas en relación con otros polímeros conductores. Las características ópticas y eléctricas de los politiofenos pueden alterarse químicamente o por dopaje. Un derivado importante del politiofeno es el poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT), pero es insoluble en agua, lo que constituye el principal problema. Al agregar una sustancia similar a un polielectrolito llamada polisulfonatos (PSS) a la matriz de PEDOT, se resuelve el problema de solubilidad. El PSS actúa como agente dopante y estabilizador de las cargas positivas (Rayar et al., 2024).

Algunos procesos de síntesis de los CPs son: síntesis química, síntesis electroquímica, síntesis fotoquímica, enfoque de metátesis, método de

emulsión concentrada (CEM), método de inclusión (IM), polimerización en estado sólido (SEP), polimerización de plasma (PP) y método de pirólisis (Ding et al., 2024). El PEDOT se sintetiza normalmente a gran escala a través de la polimerización química oxidativa o electroquímica del monómero 3, 4-etilendioxitiofeno (EDOT). La síntesis química del CP se produce dentro de la oxidación/reducción del monómero seguida de la polimerización. La ventaja del proceso de síntesis química es la producción en masa a un precio bajo. La polimerización química requiere de la reactividad y solubilidad de los oligómeros y del polímero con baja masa molecular (Ding et al., 2024). El uso de disolventes en la síntesis produce películas más compactas y uniformes que exhiben mayor conductividad (Marek et al., 2024). Se ha demostrado que los líquidos iónicos mejoran aún más algunas funcionalidades de la película que contiene PEDOT, por ejemplo, conductividad y electroluminiscencia. En la síntesis química se utilizan agentes oxidantes como el cloruro de hierro (III) (FeCl_3) o persulfato de amonio (APS). A diferencia de la polimerización química oxidativa, la polimerización electroquímica es impulsada por el potencial electrostático aplicado (Zhu et al., 2024; Marek et al., 2024).

Un inconveniente del PEDOT es su baja estabilidad, dando como resultado la pérdida de su eficiencia después de un determinado número de ciclos de carga y descarga. Además, los polímeros conjugados pueden degradarse rápidamente por procesos de oxidación y fotooxidación. Existen diferentes formas de solucionar este problema, como la adición de nanomateriales para promover su conductividad y la forma de preparación.

Nanocompuestos poliméricos para aplicaciones OLED

Se ha observado que los polímeros conjugados reforzados con nanocompuestos (NCP) aumentan la conductividad eléctrica y estabilidad del material anfitrión. La palabra nanocompuesto se utiliza para aquellos materiales compuestos o híbridos para los cuales el tamaño de un componente está en el rango nanométrico (Mandal et al., 2024). Los materiales de tamaño nanométrico muestran propiedades físicas interesantes

que conducen a un rendimiento único para aplicaciones OLED, lo que los hace bastante atractivos para los dispositivos optoelectrónicos. En general, un nanocompuesto tiene propiedades mejoradas en comparación con los componentes individuales, lo que permite su uso para una aplicación particular, como en tecnología portátil y electrónica flexible. El comportamiento de dichos nanocompuestos depende de parámetros de diseño como concentración, estructura, tamaño, forma, etc. (Mandal et al., 2024). En los CPN, la matriz polimérica es reforzada con diferentes materiales inorgánicos u orgánicos como nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono (CNT), grafeno y negro de carbono (Kumar et al., 2024). Los NCP se pueden obtener por diferentes métodos, con diversas formas y configuraciones como 0D (nanoesféras y nanopartículas), 1D (nanofibras, nanobarras, nanocables, nanocintas, nanocintas), 2D (nanoañillos, nanoláminas, nanodiscos, nanoclips). Estos materiales presentan mejores conductividades (Vipu Vinayak et al., 2024).

La conductividad del nanocompuesto está relacionada con la movilidad de los portadores, la estructura ordenada, morfología, grado de dopaje, tamaño y distribución del reforzante, tipo de reforzante, tipo de sustrato, interacciones entre los componentes, la orientación de la interfaz, entre otros. Por ejemplo, la morfología del polímero se puede controlar mediante la variación de parámetros como el tiempo de reacción, pH, temperatura y la concentración. Además, es importante lograr un balance entre la conductividad eléctrica y la flexibilidad mecánica del dispositivo. En consecuencia, la selección de polímeros, dopantes efectivos y procesos de dopaje son factores determinantes de desempeño del material (Rayar et al., 2024). Comprender y optimizar estos factores es fundamental para diseñar y fabricar materiales con las propiedades eléctricas y ópticas deseadas.

Propiedades electrónicas y eléctricas de polímeros conjugados

Las estructuras de bandas electrónicas de un material se utilizan normalmente para describir sus propiedades eléctricas. Los materiales se clasifican desde aislantes hasta conductores, dependiendo de la diferencia de energía entre las bandas de valencia y conducción. Las bandas de va-

lencia y conducción se superponen, y la brecha de banda es menor para los materiales intrínsecamente conductores. Los polímeros conductores tienen enlaces conjugados en sus cadenas principales, lo que permite que los electrones se muevan. La configuración de la cadena de polímero, el material dopante y la longitud afectan significativamente la conductividad (Rayar et al., 2024).

Los polímeros puros pueden funcionar como aislantes o semiconductores y la conductividad aumenta con la concentración de dopaje. El dopaje de tipo p y tipo n produce bipolarones/polarones positivos y negativos. El polímero conductor que contiene dopantes conductores experimenta procesos redox, agregando y eliminando electrones (Ravikumar et al., 2024; Rayar et al., 2024). Cuando se produce el dopaje de tipo p, los electrones se mueven desde el orbital molecular ocupado alto (HOMO) de la cadena principal del polímero hasta la especie dopante, generando un hoyo que resulta por la escasez de electrones en la cadena principal. Sin embargo, en el caso del dopaje de tipo n, los electrones viajan al LUMO del polímero y aumentan la densidad electrónica, lo que resulta en portadores de carga que mejoran la conductividad, Figura 6.

Efectos electrocrómicos y electroluminiscentes de los polímeros conjugados

La capacidad de producir luz mediante excitación eléctrica se conoce como electroluminiscencia y tanto los semiconductores inorgánicos como los orgánicos exhiben esta propiedad. Como se muestra en la Figura 7, es necesario el movimiento de los huecos y electrones desde los electrodos correspondientes y producir el fenómeno de electroluminiscencia.

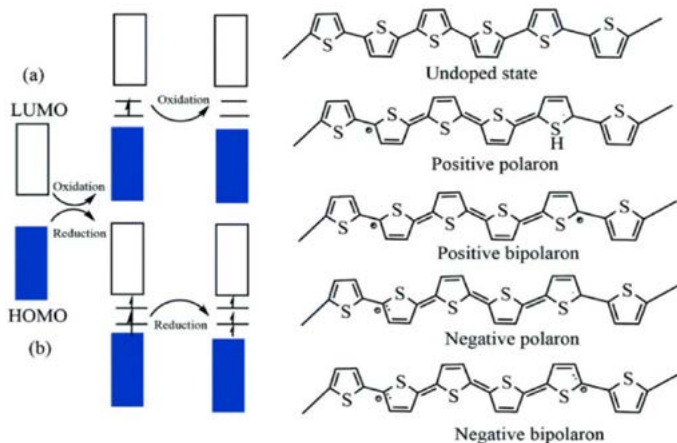


Figura 6. Perfiles de bandas electrónicas y configuraciones moleculares del politiofeno (PT) para los escenarios de dopaje de (a) tipo p y (b) tipo n (Rayar et al., *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2024)

Estas cargas opuestas se unen para generar excitones; la recombinación hace que los excitones se desintegren de forma radioactiva (Rayar et al., 2024). Los enlaces π en la cadena principal de los polímeros conjugados exhiben un comportamiento de semiconductor a metálico. Una molécula a menudo tiene un enlace simple y doble; la energía del fotón debe ser mayor que la de la banda prohibida para excitar a los electrones de los enlaces π de la cadena principal del polímero, reduciendo la brecha de energía (E_g). Los polímeros conductores emiten luminiscencia y fluorescencia a través de la transferencia de electrones desde el HOMO al LUMO. Los polímeros conductores sufren cambios ópticos debido a reacciones químicas e influencias ambientales como una tensión en la matriz del polímero y alteraciones en la planaridad. Muchos factores físicos y químicos, como las impurezas de ionización y excitación, los fonones que se encuentran en el factor de tensión del polímero, los excitones, la recombinación, etc., afectan las propiedades ópticas. Tres factores químicos distintos que afectan las propiedades ópticas son la longitud de la conjugación, la reacción topoquímica y el grado de anisotropía (Thinley et al., 2023).

Mejora en la generación de color

Los dispositivos electroluminiscentes (EL) basados en nanocompuestos poliméricos son atractivos por su bajo voltaje de funcionamiento, bajo consumo de energía, facilidad de fabricación y bajo costo. Recientemente, son utilizados en los diodos emisores de luz orgánicos blancos (Mandal et al., 2024).

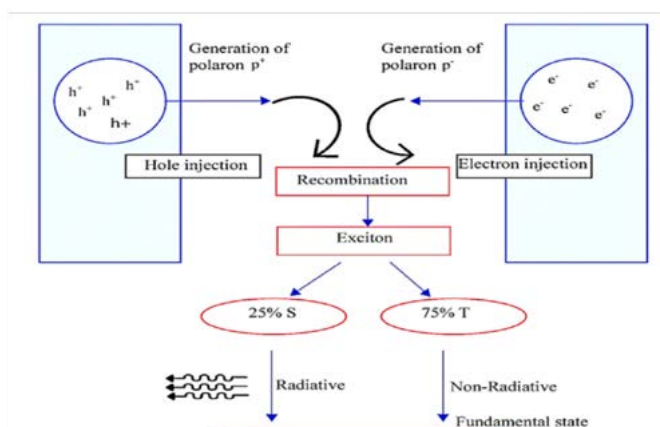


Figura 7. Efecto de electroluminiscencia del diodo del polímero conductor (Rayar et al., Nano-Structures & Nano-Objects, 2024)

Una combinación adecuada de emisiones verdes, rojas y azules puede obtener una emisión de luz blanca. Los diodos emisores de luz orgánicos blancos (OLED) han llamado mucho la atención por su posible aplicación en pantallas a todo color con la ayuda de filtros, por ejemplo, el fondo de las pantallas LCD y en fuentes de iluminación de estado sólido. Por esta razón, se tiene la idea de que la luz blanca es el color más importante en la aplicación de iluminación. Algunas estrategias para hacer el OLED blanco son a través de una estructura multicapa que consta de dos o más capas emisoras con materiales orgánicos o inorgánicos. OLED que consiste en una estructura multicapa; se pueden combinar diferentes emisiones de diferentes capas para dar el color blanco o usar diferentes técnicas, por ejemplo, dopaje para tomar la cantidad adecuada de dopantes en el mismo anfitrión, o usar el efecto de microcavidad de una capa de emisión, etc. (Mandal et al., 2024).

Tipos de OLED

Los OLED se clasifican en función de los diferentes usos, funciones y diseño. A continuación se dan algunos ejemplos (Mandal et al., 2024):

OLED de matriz pasiva (PMOLED): esta tecnología es adecuada para termostatos, electrodomésticos o aplicaciones con pantallas más pequeñas y selectivas. Consta de tiras de cátodo y ánodo perpendiculares entre sí. La intersección de las tiras de cátodo y ánodo forma un píxel desde el que se emite luz.

OLED de matriz activa (AMOLED): Contienen capas completas de cátodo, moléculas orgánicas y ánodo. La matriz activa presenta un transistor de película fina (TFT) en el que cada píxel emite luminiscencia y proporciona imágenes más sensibles en un ángulo de visión amplio. Las pantallas AMOLED se han utilizado en teléfonos inteligentes, tabletas, cámaras digitales y dispositivos portátiles, relojes inteligentes, pantallas flexibles, monitores de computadora, televisores de pantalla grande y carteles electrónicos o vallas publicitarias.

OLED transparentes (TOLED): Constan de un cátodo, un ánodo y un sustrato completamente transparentes. Se aplican en pantallas de visualización frontal, computadoras portátiles, teléfonos móviles y ventanas inteligentes.

OLED plegables (FOLED): Consisten en un sustrato flexible, ya sea plástico, metal o vidrio flexible. Son ligeros, delgados, duraderos e irrompibles. Se utilizan en la fabricación de televisores curvos, ropa inteligente, teléfonos celulares, chips integrados, receptores GPS y pantallas OLED.

LED blanco (WOLED): Son candidatos para el ahorro de energía, tienen calidad de color blanco más brillante y uniforme, con la posibilidad de ajustar el color y son más ecológicos que los dispositivos de iluminación habitual, como las bombillas incandescentes y las luces fluorescentes. Dado que consumen menos energía y son rentables, son lo suficientemente eficientes como para fabricar láminas grandes. Son ideales para la iluminación de automóviles debido a su bajo grosor, peso ligero y capacidad para mostrar un negro intenso y una luz que puede ser muy nítida. Se adaptan al plástico y otros sustratos flexibles.

LED de puntos cuánticos (QLEDs): Los puntos cuánticos son nanocristales diminutos que emiten luz cuando se excitan. Se fabrican utilizando una solución de plástico sobre un óxido de indio y estaño (ITO) utilizado inicialmente como ánodo para el LED. Los QLED se pueden hacer transparentes, muy delgados y flexibles. Estas propiedades hacen que los QLED sean fáciles de integrar en los diseños de productos portátiles. Algunos de los usos más notables hasta ahora han sido los avances en componentes láser ópticos, células solares, detectores de luz y sensores de imagen.

Duración de vida y estabilidad del dispositivo

En la tecnología emisiva (OLED), hay dos cosas importantes, es decir, la estabilidad y la duración del dispositivo, y en particular el envejecimiento de los tres colores primarios. La duración de vida del dispositivo se define generalmente como el brillo. Algunos factores afectan la duración de vida de los dispositivos orgánicos, como el aumento de la temperatura; la duración de vida cae drásticamente. Los fenómenos de degradación ocurren tanto en condiciones de funcionamiento y almacenamiento, esto da como resultado la disminución de la luminancia del dispositivo y un aumento del voltaje de trabajo con el tiempo para un valor de densidad de corriente constante (Mandal et al., 2024).

Tecnologías de fabricación para OLED

Existen varias técnicas mediante las cuales se pueden fabricar dispositivos OLED, el método específico empleado puede variar según el fabricante y el tipo de tecnología OLED utilizada. Algunos métodos de fabricación comunes son (Ravikumar y Dangate, 2024): Evaporación térmica al vacío (VTE), impresión por inyección de tinta, deposición orgánica en fase vapor (OVPD), celdas electroquímicas de emisión de luz orgánica (OLEC), enmascaramiento de material orgánico, Imágenes térmicas inducidas por láser (LITI), deposición orgánica por haz molecular (OMBD), procesamiento sol-gel, recubrimiento por centrifugación, recubrimiento por pulverización, recubrimiento con matriz de ranura, impresión de rollo

a rollo, impresión en huecograbado, impresión flexográfica, electrohilado, etc. El recubrimiento por centrifugación e impresión por inyección de tinta para OLED basados en polímeros proporcionan una vía prometedora para la producción en masa. Si bien la evaporación térmica al vacío produce OLED con un rendimiento excelente, los métodos basados en solución ofrecen ventajas distintivas en términos de rentabilidad, proceso de fabricación simplificado y la capacidad de cubrir grandes áreas (Li et al., 2024; Kim et al., 2024). Las técnicas basadas en solución son deseables para la fabricación eficiente de dispositivos OLED.

Conclusiones

El futuro de la tecnología electrónica es una mirada a la innovación y al desarrollo de nuevos materiales para productos con aplicaciones antes no imaginables. El atractivo de la electrónica flexible reside en la capacidad del dispositivo a adaptarse a cualquier superficie arbitraria e incorporar componentes móviles, una hazaña que sigue siendo difícil de alcanzar para la electrónica rígida convencional. Los dispositivos electrónicos flexibles no solo son utilizados para los circuitos integrados conformables reversiblemente, plegables y extensibles, sino también para pantallas portátiles. El desarrollo de la electrónica extensible impulsará la creación de sistemas robóticos con componentes blandos y móviles, allanando el camino para una tecnología robótica más versátil y adaptable. Una ruta probada para alcanzar este propósito implica el uso de polímeros conductores y sus mezclas con nanomateriales. Los polímeros conductores son ideales para aplicaciones optoelectrónicas debido a su alta conductividad, flexibilidad, capacitancia específica y tasa de transferencia de energía. Los materiales poliméricos conductores orgánicos, como el PEDOT, han demostrado ser efectivos para dispositivos OLED. El papel de los nanomateriales (como metales de transición, óxidos metálicos inorgánicos, grafeno, CNT, etc.) en los dispositivos OLED es aumentar la conductividad eléctrica al tiempo que se conserva la transparencia óptica, teniendo en cuenta los diferentes métodos de fabricación. Para mejorar el rendimiento de estos dispositivos, los trabajos futuros deberían centrarse en el desarrollo de compuestos de polímeros conductores híbridos.

Referencias

- Abbasi, M.S., Sultana, R., Ahmed, I., Adnan, M., Shah, U.A., Irshad, M.S., Vu, H.N., Do, L.T., Thi, H.T., Pham, T.D., Nang, H.X., Dao, V.D. (2024). Contemporary advances in organic thermoelectric materials: Fundamentals, properties, optimization strategies, and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200, 114579.
- AlSalhi, M.S., Alam, J., Dass, L.A., Raja, M. (2011) Recent advances in conjugated polymers for light emitting devices. *International Journal of Molecular Sciences*, 12, 2036-2054.
- Darwiche, M., Faraj, J., Chahine, K., Shaito, A., Awad, S., Mortazavi, M., Khaled, M. (2024) A comprehensive recent review and practical insights on the usage of advanced materials and enhancement strategies in thermoelectric applications. *Results in Engineering*, 24, 103354.
- Ding, H., Hussein, A.M., Ahmad, I., Latef, R., Abbas, J.K., Abd Ali, A.T., Saeed, S.M., Abdulwahid, S.M., Ramadan, M.F., Rasool, H.A., Elawady, A. (2024). Conducting polymers in industry: A comprehensive review on the characterization, synthesis and application. *Alexandria Engineering Journal*, 88, 253-267.
- Gupta, C.V., Dixit, S.J., Agarwal, N., Bose, B. (2024). Film thickness dependent color purity of WOLEDs in a Phenanthroimidazole derivative due to electromers. *Synthetic Metals*, 304, 117570.
- Imán, R.N., Younas, M., Harrabi, K., Mekki, A. (2024). A comprehensive review on advancements and optimization strategies in dye-sensitized solar cells: Components, characterization, stability and efficiency enhancement. *Inorganic Chemistry Communications*, 165, 12488.
- Kim, J., Lee, D.H., Park, J., Lee, S., Lee, J. (2024). Molecular design and synthesis of highly soluble hole transporting materials based on phenylnaphthalene cores for solution-processible OLEDs. *Dyes and Pigments*, 222, 111879.
- Kumar, A., Kumar, N. (2024) A review on the electrically conductive transparent polymer composites: Materials and applications. *Materials Today: Proceedings*, 113, 50-59.
- [15] Cabriaes Gómez, R.C. (2004). Luminiscencia en polímeros semiconductores. *Ingenierías*, VII (23), 1-16.

- Li, H., Yan, H., Zhang, X., Shi, K., Kuang, C., Zheng, X., He, Y., Meng, L., Xu, H., Meng, Z. Yan, C., Wei, G., Zhu, Y., Meng, H. (2024) Highly efficient and stable solution-processed deep-blue OLEDs with LT95 over 50 h at 1000 nit. *Chemical Engineering Journal*, 486, 150142.
- Lima, A.H., Raeyani, D., Sudmand, S.A., Naghshara, H., Asgari, A. Developing flexible QLEDs using metal oxide and polymer combination. *Optical Materials*, 149, 115041.
- Liu, C., Du a, H., Yu, Y., Chen, Z., Ren, J., Fan, J., Liu, Q., Han, S., Pang, Z. (2024) Dynamics of electron-hole pairs in interface exciplex OLEDs investigated by magnetic field effects. *Organic Electronics*, 128, 107025.
- Mandal, G., Bauri, J., Choudhary, R.B. (2024). Conjugated polymeric nanocomposite-based light-generating active materials for OLED applications: A review. *Materials Science and Engineering B*, 303, 117271.
- Marek, T., Vincze, T., Szabo, T., Keresztes, Z. Conductive and photo-luminescent functionality of reconstituted particle layers prepared from electrodeposited PEDOT films. *Materials Chemistry and Physics*, 314, 128925.
- Ravikumar, K., Dangate, M.S. (2024). Advancements in stretchable organic optoelectronic devices and flexible transparent conducting electrodes: Current progress and future prospects. *Heliyon*, 10, e33002.
- Rayar, A., Chapi, S., Murugendrappa, M.V., Babaladimath, G., Harish, K.N., Kakarla, R.R., Raghu, A.V. (2024). Organic conjugated polymers and their nanostructured composites: Synthesis methodologies and electrochemical applications. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 37, 101102.
- Thinley, T., Dominic, A., Divya, V., Anilkumar, K.M., Shivaraju, H.P. Nano-Struct. *Nano-Objects*, 35, 101022.
- Ungur, L. (2018). *Introduction to the electronic structure, luminescence, and magnetism of lanthanides. Lanthanide-Based Multifunctional Materials*. Elsevier, 1-58.
- Vipu Vinayak, V.J., Deshmukh, K., Murthy, V.R.K., Khadheer Pasha, S.K. (2024). Conducting polymer based nanocomposites for super-capacitor applications: A review of recent advances, challenges and future prospects. *Journal of Energy Storage*, 100, 113551.

- Yakimanskiy, A. A., Mitroshin, A. M., Chulkova, T. G., Miltsov, S. A., Yakimansky, A. V. (2024). Fluorene-based p-conjugated polymers for OLEDs: advances, opportunities, and challenges. *Focus Article, Mendelev Communication*, 34, 609-629.
- Zhu, Y., Cao, Z., Che, L., Lin, H., Zhang, Q., Zhou, H. (2024). A pioneering study on EDOT recovery from the PEDOT wastewater: Integration of COSMO-SAC prediction, experiment, and process simulation. *Journal of Cleaner Production* 452 (2024) 142082.

Capítulo 13

Análisis exergetico no estacionario de un calentador solar de aire de placa plana con diferentes rugosidades en el absorbedor

Gustavo Espinosa García¹

gustavo.espinosa@unicach.mx

Guillermo Ibáñez Duharte¹

guibdu@gmail.com

Orlando Lastres Danguillecourt¹

olastres@hotmail.com

Joel Pantoja Enríquez¹

jpe2005@gmail.com

<https://doi.org/10.61728/AE20252076>



¹ Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

Resumen

El rendimiento térmico de un calentador solar de aire se puede mejorar de manera efectiva mediante el uso de rugosidades artificiales con diferentes formas y tamaños en la placa absorbidora. En el presente trabajo, se utilizó un modelo teórico no estacionario de un calentador solar de aire, validado experimentalmente en un trabajo previo y formado por 6 ecuaciones diferenciales acopladas de primer orden, para evaluar los impactos de diferentes geometrías de rugosidad artificial en el absorbedor sobre la transferencia de calor y la eficiencia exergética. Para este propósito, se realizó el análisis exergético seleccionando 16 geometrías diferentes de rugosidades con sus respectivas correlaciones de transferencia de calor y características de flujo. Los parámetros óptimos de las diferentes geometrías rugosas, reportados en trabajos anteriores, se utilizaron para realizar la simulación no estacionaria usando el programa MATLAB. Los efectos de cinco valores diferentes de flujo másico de la sustancia de trabajo fueron examinados. Los resultados revelaron que las geometrías rugosas que presentaron mayores valores de eficiencia de segunda ley fueron los obstáculos en delta no perforados para el flujo de 0,003 kg/s, el generador de vórtice de ala en delta para el flujo de 0,0077 kg/s, los deflectores perforados en V para los flujos de 0,0125 y 0,01725 kg/s, y las nervaduras múltiples en V espaciadas para el flujo de 0,022 kg/s.

Introducción

El calentador solar de aire (CSA) desempeña un papel importante en el aprovechamiento de la energía solar para aplicaciones en rangos de temperatura bajos y medios, como el secado de alimentos y la calefacción de espacios. Sin embargo, a pesar de la creciente demanda de calentadores solares de aire, estos dispositivos tienen un rendimiento térmico menor debido al bajo coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa absorbente fija y el fluido de trabajo.

Estudios recientes relacionados con la mejora del rendimiento térmico del CSA involucran técnicas como modificaciones de la superficie del absorbedor, múltiples pasajes de aire, absorbedores porosos, impacto de chorro de aire en la superficie del absorbedor, integración de materiales de almacenamiento de calor, colectores híbridos de doble propósito y colectores solares híbridos fotovoltaicos/térmicos (Vengadesan y Senthil, 2020). La modificación de la superficie de la placa absorbente en contacto con el fluido de trabajo es un enfoque típico y efectivo utilizado por los investigadores para mejorar la tasa de transferencia de calor en un flujo de fluido (Gawande et al., 2014). Esta práctica mejora significativamente el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa absorbente caliente y el aire que fluye al romper la subcapa viscosa. Por lo tanto, nuestro objetivo es analizar los impactos de la implantación de obstáculos en la superficie de la placa absorbente en contacto con el flujo de aire sobre el rendimiento térmico del CSA. Generalmente, la placa absorbente debe diseñarse o modificarse de modo que el nuevo diseño o modificación solo rompa la subcapa viscosa y al mismo tiempo el flujo principal permanezca ininterrumpido con pérdidas hidráulicas y térmicas mínimas (Borah et al., 2023). Aunque los obstáculos en la superficie absorbente de un calentador de aire solar pueden aumentar la eficiencia térmica al crear condiciones turbulentas, pueden reducir la eficiencia exergética del sistema debido a un aumento en la caída de presión (Avargani et al., 2022). Por lo tanto, es esencial encontrar los parámetros de configuración óptimos para tener la mayor tasa de transferencia de calor con la menor caída de presión posible dentro del conducto (Khimsuriya et al., 2022).

Con base en el estudio exhaustivo de la literatura, se encontró que el desempeño del CSA se analizó para diferentes geometrías de rugosidad. Bhushan y Singh (2011) realizaron una investigación experimental sobre la transferencia de calor y el factor de fricción del CSA que tiene una placa absorbente protuberante. Kumar et al. (2013) presentaron los resultados de una investigación experimental de la transferencia de calor y la fricción del flujo de aire en un conducto rectangular que tiene múltiples nervaduras en forma de V con un espacio como rugosidad artificial. Sethi et al. (2012) llevaron a cabo una investigación experimental para una variedad de parámetros operativos del sistema con el fin de analizar el efecto de

la rugosidad artificial en la transferencia de calor y las características de fricción en un conducto de calentador de aire solar con elementos de rugosidad con forma de hoyuelos dispuestos de manera angular en la placa absorbente. Alam et al. (2014) estudiaron los efectos de los deflectores en forma de V con orificios de perforación unidos a una pared calentada de un conducto de calentador de aire solar rectangular en la transferencia de calor y las características de fricción. Baisi et al. (2020) investigaron la transferencia de calor, el factor de fricción y el factor de mejora térmica del flujo en un canal rectangular rugoso con generadores de vórtices en forma de delta curvado. Se estudiaron dos casos, uno con deflectores perforados y el otro con deflectores no perforados. Singh y Varun (2014) analizaron los efectos de varios parámetros geométricos en la transferencia de calor y las características de fricción para múltiples costillas en forma de arco. Skullong y Promvonge (2014) presentaron un estudio experimental sobre la transferencia de calor y las características de fricción del flujo en un canal de calentador de aire solar equipado con un generador de vórtice tipo aleta delta. Alam y Kim (2017) desarrollaron una investigación numérica de un conducto de calentador de aire solar rugoso con nervaduras de protrusión cónica.

Mahanand y Senapati (2021) estudiaron numéricamente las características termohidráulicas de un CSA con nervaduras de cuarto de círculo en la placa absorbente y compararon tres disposiciones diferentes de nervaduras de cuarto de círculo. Yadav et al. (2021) presentaron nuevas correlaciones para calentadores solares de aire rugosos con costillas circulares. Ngo y Phu (2020) revisaron extensamente una placa absorbente unida a múltiples costillas de perfil de curva cónica. Patel et al. (2020) Integraron un nuevo tipo de elemento de rugosidad en forma de costillas de perfil NACA en posición inversa para estudiar los efectos sobre el rendimiento termohidráulico del CSA. Karmare y Tikekar (2009) presentaron los resultados de una investigación experimental sobre el rendimiento termohidráulico óptimo del CSA con diferentes asperezas de nervaduras metálicas como rugosidad. Layek et al. (2007) investigaron numéricamente la generación de entropía en el conducto del calentador de aire solar que tiene rugosidad de nervadura-ranura biselada. Sureandhar et al. (2021) desarrollaron un modelo térmico para analizar las influencias de la disposición de las aletas de las nervaduras en arco y la longitud de

la placa absorbente en las características de transferencia de calor del CSA. Con base en toda la literatura revisada anteriormente, se puede concluir que el desempeño térmico de los calentadores solares de aire con diferentes geometrías rugosas artificiales se calculó y comparó de varias maneras. Sin embargo, en estos trabajos previos, los estudios se llevaron a cabo para condiciones estacionarias y los valores óptimos de los parámetros de las geometrías rugosas investigadas con el mayor desempeño térmico no se consideraron en los cálculos.

Por tanto, en la presente contribución se ampliaron los estudios previos relacionados con el análisis de un colector solar de placa plana con diferentes geometrías rugosas artificiales para la mejora de la transferencia de calor, por un lado, para aplicar un modelo no estacionario y, por otro, para utilizar los valores óptimos de las diferentes geometrías rugosas en los cálculos. Los objetivos son presentar los resultados obtenidos en la evaluación numérica no estacionaria de un colector solar de placa plana para calentamiento de aire basado en el análisis de segunda ley de la termodinámica y encontrar la geometría del absorbedor que proporciona los mayores valores de eficiencia exergética. Esto permitirá, por un lado, estudiar los impactos de parámetros geométricos, propiedades termofísicas de materiales utilizados y condiciones de operación en el rendimiento térmico del colector y, por otro lado, encontrar un conjunto óptimo de parámetros geométricos con los valores más altos de eficiencia. En particular, los cálculos se realizan utilizando los valores óptimos de los parámetros reportados por los diferentes autores para cada tipo de rugosidad artificial y el flujo másico se varía de 0,003 a 0,022 kg/s.

Descripción del sistema y consideraciones

Se considera el modelo del colector constituido por 6 elementos:

1. Cubierta superior
2. Placa absorbedora
3. Fluido de trabajo: espacio entre absorbedor y aislante
4. Aislante
5. Placa base
6. Marco lateral

La Figura 1 muestra el diagrama del colector solar de aire. Se indican y pueden visualizarse los seis componentes considerados en el sistema y los mecanismos de transferencia de calor que describen la interacción entre ellos. Los subíndices a, c, ap, ft, bp, in y sf representan el ambiente, cubierta de vidrio, absorbedor, fluido de trabajo, placa base, aislamiento y marco lateral, respectivamente, mientras que h_c , h_r y Q son los coeficientes de transferencia de calor por convección, radiación y conducción, respectivamente.

- Las consideraciones fundamentales en el modelo son:
- Operación en estado transitorio.
- El aire en el colector se considera como un gas ideal transparente a la radiación.
- La temperatura ambiente y la radiación varían con el tiempo.
- Las ecuaciones de balance de energía se resuelven para cada elemento diferencial de longitud Δx en los que se divide el colector a largo de su longitud para cada tiempo.

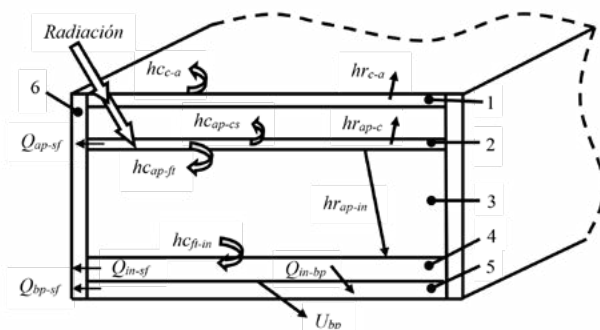


Figura 1. Diferentes elementos del colector y mecanismos de transferencia de calor entre ellos

Modelación matemática

Las seis ecuaciones de balance de energía de los elementos del colector que conforman el modelo matemático validado experimentalmente en (Espinosa et al., 2023) son:

Cubierta superior

La cubierta superior absorbe la radiación solar, transfiere calor por convección y radiación al ambiente, y recibe calor por convección y radiación de la placa absorbente.

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{1}{\rho_c V_c C_c} [\alpha_c G_T A + (h_{c,ap-c} + h_{r,ap-c}) A (T_{ap} - T_c) - (h_{c,c-a} + h_{r,c-a}) A (T_c - T_a)] \quad (1)$$

Placa absorbente

Cuando la radiación solar pasa a través de la cubierta superior, es absorbida por la placa absorbente aumentando su temperatura. Luego, la placa absorbente, transfiere calor por convección a la cubierta superior y al fluido de trabajo, por radiación a la cubierta superior y al aislamiento y por conducción al marco lateral.

$$\frac{\partial T_{ap}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{ap} V_{ap} C_{ap}} [\tau_c \alpha_{ap} G_T A - (h_{c,ap-c} + h_{r,ap-c}) A (T_{ap} - T_c) - h_{c,ap-ft} A (T_{ap} - T_{ft}) - h_{r,ap-in} A (T_{ap} - T_{in}) - Q_{ap-sf} A_{ap-sf} (T_{ap} - T_{sf})] \quad (2)$$

Flujo de trabajo

El aire pasa por el conducto colector y recibe calor por convección de la placa absorbente y la placa aislante inferior.

$$\frac{\partial T_{ft}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{ft} V_{ft} C_{ft}} \left[h_{c,ap-ft} A (T_{ap} - T_{ft}) - h_{c,ft-in} A (T_{ft} - T_{in}) - \rho_{ft} V_{ft} C_{ft} u \frac{\partial T_{ft}}{\partial x} \right] \quad (3)$$

Aislamiento

El aislamiento recibe calor por radiación de la placa absorbente. Además, transfiere calor por convección al fluido y por conducción a la placa base y al marco lateral.

$$\frac{\partial T_{in}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{in} V_{in} C_{in}} [h_{r,ap-in} A (T_{ap} - T_{in}) + h_{c,ft-in} A (T_{ft} - T_{in}) - Q_{in-bp} A (T_{in} - T_{bp}) - Q_{in-sf} A_{in-sf} (T_{in} - T_{sf})] \quad (4)$$

Placa base

La placa base recibe calor por conducción del aislamiento y transfiere calor por convección y radiación al entorno y por conducción al marco lateral.

$$\frac{\partial T_{bp}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{bp} V_{bp} C_{bp}} [Q_{in-bp} A (T_{in} - T_{bp}) - U_{bp} A (T_{bp} - T_a) - Q_{bp-sf} A_{bp-sf} (T_{bp} - T_{sf})] \quad (5)$$

Marco lateral

El marco lateral absorbe radiación solar e intercambia calor por conducción con el absorbedor, el aislante y la placa base, mientras que lo hace de manera combinada por conducción y convección con el ambiente desde su superficie interior.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{sf}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{sf} V_{sf} C_{sf}} [& \alpha_{sf} G_T A_{sf} + Q_{ap-sf} A_{ap-sf} (T_{ap} - T_{sf}) \\ & + Q_{in-sf} A_{in-sf} (T_{in} - T_{sf}) + Q_{bp-sf} A_{bp-sf} (T_{bp} - T_{sf}) \\ & - U_{sf} A_{sf} (T_{sf} - T_a)] \end{aligned} \quad (6)$$

Los datos de entrada para el cálculo tanto de las propiedades termofísicas de materiales utilizados como los relacionados con la geometría del dispositivo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de entrada para el cálculo

		Cubierta	Ab-sorbe-dor	Aislante	Placa base
k (W/mC)	Conductividad térmica	0.7	52	0.04	0.15
ε	Emisividad	0.9	0.9	0.9	
K (m ⁻¹)	Coefficiente de extinción	54.5			
n_2	Índice de refracción	1.52			
P (kg/m ³)	Densidad	2800	7800	16	450
C (J/kgC)	Calor específico	750	500	1200	2700
τ	Transmisividad	0.75			
α	Absortividad		0.88		
Espesor (m)		0.04	0.001	0.025	0.025
Altura recinto 0.005 m y altura del canal del fluido de trabajo 0.04 m					
Longitud del colector 1.34 m y ancho 0.26 m					

Las correlaciones utilizadas para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor por convección entre la placa absorbidora y el fluido (número de Nusselt), así como los factores de fricción para cada configuración rugosa del absorbedor pueden ser consultados en la anexo1. El resto de los coeficientes de transferencia de calor presentes en las ecuaciones de balance de energía se determinan utilizando las expresiones que aparecen en (Espinosa et al., 2023). Además, los cálculos se realizaron para un día típico con cielo despejado. Las variaciones temporales de la radiación solar y la temperatura ambiente del día seleccionado pueden

ser consultadas también en (Espinosa et al., 2023). Se alcanzaron valores máximos para la radiación solar de 1280 W/m² y para la temperatura ambiente de 40 °C en el horario del mediodía.

Análisis exergético

El análisis exergético es un método utilizado para calcular el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en un estado específico. Este análisis incluye los siguientes términos:

- Exergía de entrada: La exergía neta de entrada al calentador de aire solar incluye la exergía de la radiación solar:

$$E_{in} = G_T A \left[1 - \frac{T_a}{T_s} \right] \quad (7)$$

T_s es la temperatura aparente del sol tomada como 5600 K.

- Exergía útil o de salida: A partir de la ecuación de balance exergético del colector de aire cuando las variaciones de energía cinética y potencial son despreciables y considerando la caída de presión que puede ocurrir entre la entrada y la salida del calentador solar de aire, la exergía útil o de salida puede expresarse como:

$$E_{out} = \dot{m} \left[C(T_{ftout} - T_{ftin}) - T_a \left(\ln(C - R) \ln \left(\frac{T_{ftout}}{T_{ftin}} \right) - R \ln \ln \left(\frac{\rho_{out}}{\rho_{in}} \right) \right) - \frac{\Delta P}{\rho \eta_{fan}} \right] \quad (8)$$

- Eficiencia exergética: La eficiencia energética del calentador de aire solar, según la segunda ley de la termodinámica, se define por:

$$\eta_{II} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = 1 - \frac{E_d}{E_{in}} \quad (9)$$

donde E_d es la destrucción de exergía dada por:

$$E_d = E_{in} - E_{out} \quad (10)$$

Procedimiento numérico de solución

Los cálculos numéricos para obtener la caracterización térmica de los componentes del colector solar de aire se realizaron con un código iterativo desarrollado en el software MATLAB utilizando el método numérico de Runge-Kutta-Fehlber de cuarto y quinto orden (RK45). En el método RK45 se utilizan dos aproximaciones diferentes para obtener la solución y se puede determinar un tamaño de paso óptimo en cada paso de integración en el tiempo en función de una precisión o error específico que se compara con la diferencia entre los resultados de estas dos aproximaciones. Este procedimiento se realiza para cada configuración rugosa de placa absorbente y se obtiene la eficiencia exergética del colector para cada geometría.

Resultados y discusión

El análisis de exergía se realizó para cinco valores distintos de flujo másico: 0.003, 0.00775, 0.0125, 0.01725 y 0.022 kg/s. Para el flujo másico con valor de 0.003 kg/s, la configuración que presenta la mayor eficiencia exergética es la de obstáculos no perforados en delta, con un impacto significativo en el rendimiento exergético del sistema. La eficiencia exergética máxima de un colector liso alcanza un valor de 3.05 % para este flujo en el horario del mediodía, cuando mayores son los valores de radiación solar incidente, mientras que este valor se incrementa hasta un 10.62 % en presencia de los obstáculos no perforados en forma de delta, mostrando una mejora del 248.2 %, que es 3.48 veces mayor que lo obtenido en un colector liso. Esta mejora en la eficiencia exergética es debida fundamentalmente al incremento del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el absorbedor y el fluido de trabajo al ser mayor el área de contacto entre ambos y, por tanto, una mayor exergía útil o de salida es alcanzada.

Para el flujo másico con valor de 0.00775 kg/s la configuración que presenta la mayor eficiencia exergética es la del generador de vórtice de ala en delta (DW-A Rp=1). Para este valor de flujo, la eficiencia exergética máxima de un colector liso alcanza un 2.85 %, mientras se mejora hasta un 8.64 % en presencia del generador de vórtice de ala en delta, mostrando una mejora del 203.16 % que es 3.03 veces más de lo obtenido en un colector liso.

Por otro lado, para los flujos másicos con valores de 0.0125 y 0.01725 kg/s la configuración que presenta la mayor eficiencia exergética es la de deflectores perforados en V. Cuando el flujo es de 0.0125 kg/s, la eficiencia exergética máxima del colector liso al mediodía es de 2.80 % y la del colector con deflectores perforados en V es de 7.11%, mientras que cuando el flujo es de 0.01725 kg/s la eficiencia exergética máxima del colector liso es de 2.64 % y la del colector con deflectores perforados en V es de 5.94 %. Esto indica que en el primer caso de flujo másico igual a 0.0125 kg/s se logra una mejora del 153.93 % en la eficiencia de segunda ley que representa 2.54 veces más de lo obtenido con un colector liso, mientras que para el segundo caso de flujo másico de 0.01725 kg/s se logra una mejora del 125 % que es 2.25 veces mayor que la obtenida con el colector liso.

Finalmente, para el flujo másico con valor de 0.022 kg/s, la configuración que presenta la mayor eficiencia exergética es la de nervaduras en V múltiple con espacio. En este caso, la eficiencia exergética máxima del colector liso alcanza un 2.47 %, mientras se mejora hasta un 5.14 % en presencia de las nervaduras en V múltiple con espacio, mostrando una mejora del 108.1 %, que representa un incremento 2.08 veces comparado con el colector liso. Para cada configuración se observan tendencias diferentes de la variación del valor máximo de eficiencia exergética. De esta forma, para muchas de estas configuraciones, el valor máximo de la eficiencia exergética siempre disminuye al aumentar el flujo, mientras que para otras configuraciones es posible encontrar un valor máximo de los máximos de eficiencia (máximo de máximos) en un valor intermedio del intervalo de variación de flujo másico comprendido entre 0.003 y 0.022 kg/s. Estos comportamientos se pueden apreciar en la Tabla 2, donde se muestra un resumen de los valores máximos de eficiencia exergética co-

respondiente a cada configuración rugosa del absorbedor para cada uno de los flujos estudiados.

Tabla 2. Valores máximos de eficiencia exergética correspondiente a cada geometría rugosa del absorbedor para los diferentes flujos

Configuración	η_{II} (0.003 Kg/s)	η_{II} (0.00775 Kg/s)	η_{II} (0.0125 Kg/s)	η_{II} (0.01725 Kg/s)	η_{II} (0.022 Kg/s)	Tenden- cia
Protuberancias	0.83	0.57	0.52	0.46	0.39	Dismi- nuye
Nervadura en V múltiple con un es- pacio	7.58	7.79	6.85	5.93	5.14	Máxi- mo en 0.00775
Rugosidad de ho- yuelos	2.95	3.91	4.13	4.01	3.77	Máxi- mo en 0.0125
Deflectores perfora- dos en V	8.99	8.43	7.11	5.94	4.90	Dismi- nuye
Generador de vór- tices con deflectores no perforados	10.62	8.54	6.70	5.20	3.78	Dismi- nuye
Arco múltiple	2.72	4.13	4.58	4.49	4.19	Máxi- mo en 0.0125
Rugosidades de arco	3.53	4.34	4.36	4.08	3.70	Máxi- mo en 0.0125
Generador de vór- tice de ala en delta DWA-RP1	9.69	8.64	6.83	4.93	2.70	Dismi- nuye
Protuberancia có- nica	3.93	4.63	4.54	4.20	3.78	Máxi- mo en 0.00775
Rugosidad de un cuarto de círculo	5.14	5.56	5.18	4.67	4.19	Máxi- mo en 0.00775

Configuración	η_{II} (0.003 Kg/s)	η_{II} (0.00775 Kg/s)	η_{II} (0.0125 Kg/s)	η_{II} (0.01725 Kg/s)	η_{II} (0.022 Kg/s)	Tenden- cia
Nervaduras circulares	2.49	2.56	2.52	2.37	2.19	Máximo en 0.00775
Perfiles de curvas cónicas	3.83	4.28	4.17	3.87	3.56	Máximo en 0.00775
Perfil inverso NACA 0040	7.25	6.19	5.21	4.46	3.89	Disminuye
Diferente aspereza de nervaduras de metal	1.72	2.31	2.72	2.87	2.87	Incrementa
Ranuras achaflanadas	4.43	5.01	4.80	4.41	3.99	Máximo en 0.00775
Nervaduras de arco	3.25	5.06	5.44	5.22	4.82	Máximo en 0.0125

Se puede notar en la Tabla 3 que a medida que el flujo aumenta los valores máximos de η_{II} disminuyen en todas las geometrías rugosas. Esto se debe, por un lado, al incremento de la caída de presión a lo largo del colector con el consiguiente decremento de la exergía de salida y la η_{II} y, por otro lado, a la disminución de la diferencia de temperatura del fluido de trabajo entre la entrada y salida del colector al estar dicho fluido de trabajo un menor tiempo en contacto con el absorbedor.

Tabla 3. Resumen de las configuraciones rugosas con mayor valor de η_{II} para cada valor de flujo másico explorado y mejora obtenida al comparar con el colector de absorbedor liso

Flujo másico	Configuración	η_{II} Confi- gura- ción	η_{II} Liso	Mejora %	Mejora # veces
0.003	Obstáculo no perforado en delta	10.62 %	3.05%	248.2	3.48
0.00775	Generador de vórtice de ala en delta (DWA $R_p=1$)	8.64 %	2.85%	203.16	3.03
0.0125	Deflectores perforados en V	7.11 %	2.80%	153.93	2.54
0.01725	Deflectores perforados en V	5.94 %	2.64%	125	2.25
0.022	Nervaduras en V múltiple con un espacio	5.14 %	2.47%	108.1	2.08

Conclusiones

El presente estudio es útil para seleccionar la configuración rugosa de la superficie absorbadora del colector con la cual se alcanza la eficiencia exergética máxima y así, definir los parámetros de diseño del calentador solar de aire que garantice condiciones con la mayor transferencia de calor hacia el fluido de trabajo y menores pérdidas por fricción. Los principales resultados obtenidos se pueden resumir como:

1. El flujo fue el parámetro que determinó que tipo de configuración rugosa se debe implementar, ya que se observó que para diferentes valores de flujo fue diferente el tipo de configuración rugosa que proporcionó el valor máximo de eficiencia exergética.
2. Aunque se observaron comportamientos distintos para las diferentes configuraciones de rugosidades estudiadas, al incrementar el flujo másico se obtuvo una disminución en la eficiencia exergética independientemente del tipo de configuración rugosa que se utilice.
3. Se demostró que es posible encontrar una combinación adecuada entre el flujo másico, el factor de fricción y el número de Nusselt que permita lograr el máximo rendimiento.

4. Los mayores valores de eficiencia exergética se obtuvieron para el menor flujo másico de la sustancia de trabajo debido a la menor caída de presión en el colector, lo cual implica un menor trabajo para lograr el flujo y transferencia de calor deseados con un aumento de la exergía útil o aprovechada.
5. La mejor configuración rugosa obtenida para cada flujo másico fue aquella en la cual la extracción de calor por parte del fluido de trabajo fue la mayor y, por tanto, mayor la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del colector, que significa una mayor energía almacenada en la sustancia de trabajo.

Referencias

- Vengadesan, E., Senthil, R. (2020). A review on recent developments in thermal performance enhancement methods of flat plate solar air collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110315.
- Gawande, V.B., Dhoble, A.S., Zode, D.B. (2014). Effect of roughness geometries on heat transfer enhancement in solar thermal systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 347-378.
- Borah, P. P., Pathak, K. K., Gupta, A., Roy, A., Das, B. (2023). Experimental study of a solar air heater with modified absorber plate through square obstacles with threaded pin fins. *Applied Thermal Engineering*, 228, 120544.
- Avargani, V. M., Zendejboudi, S., Rahimi, A., Soltani, S. (2022). Comprehensive energy, exergy, enviro-exergy, and thermo-hydraulic performance assessment of a flat plate solar air heater with different obstacles. *Applied Thermal Engineering*, 203, 117907.
- Khimsuriya, Y. D., Patel, D. K., Said, Z., Panchal, H., Jaber, M. M., Natrayan, L, Patel, V., El-Shafay, A. S. (2022). Artificially roughened solar air heating technology – A comprehensive review. *Applied Thermal Engineering*, 214, 118817.
- Bhushan, B., Singh, R. (2011). Nusselt number and friction factor correlations for solar air heater duct having artificially roughened absorber plate. *Solar Energy*, 85, 1109–1118.
- Kumar, A., Saini, R. P., Saini, J. S. (2013). Development of correlations for Nusselt number and friction factor for solar air heater with rough-

- ned duct having multi v-shaped with gap rib as artificial roughness. *Renewable Energy*, 58, 151-163.
- Sethi, M., Varun, Thakur, N. S. (2012). Correlations for solar air heater duct with dimpled shape roughness elements on absorber plate. *Solar Energy*, 86, 2852–2861.
- Alam, T., Saini, R. P., Saini, J. S. (2014). Effect of circularity of perforation holes in V-shaped blockages on heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct. *Energy Conversion and Management*, 86, 952–963.
- Baissi, M. T., Brima, A., Aoues, K., Khanniche, R., Moummi, N. (2020). Thermal behavior in a solar air heater channel roughened with delta-shaped vortex generators. *Applied Thermal Engineering*, 165, 113-563.
- Singh, A. P., Varun, S. (2014). Heat transfer and friction factor correlations for multiple arc shape roughness elements on the absorber plate used in solar air heaters. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 117–126.
- Skullong, S., Promvong, P. (2014). Experimental Investigation on Turbulent Convection in Solar Air Heater Channel Fitted with Delta Winglet Vortex Generator. Fluid Dynamics and Transport Phenomena. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 22, 1-10.
- Alam, T., Kim, M. (2017). Heat transfer enhancement in solar air heater duct with conical protrusion roughness ribs. *Applied Thermal Engineering*, 126, 458-469.
- Mahanand, Y., Senapati, J. R. (2021). Thermo-hydraulic performance analysis of a solar air heater (CSA) with quarter-circular ribs on the absorber plate: A comparative study. *International Journal of Thermal Sciences*, 161, 106747.
- Yadav, A. S., Shrivastava, V., Sharma, A., Dwivedi, M. K. (2021). Numerical simulation and CFD-based correlations for artificially roughened solar air heater. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2685-2693.
- Ngo, T. T., Phu, N. M. (2020). Computational fluid dynamics analysis of the heat transfer and pressure drop of solar air heater with conic-curve profile ribs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139, 3235–3246.

- Patel, Y. M., Jain, S. V., Lakhera, V. J. (2020). Thermo-hydraulic performance analysis of a solar air heater roughened with reverse NACA profile ribs. *Applied Thermal Engineering*, 170, 114940.
- Karmare, S. V., Tikekar, A. N. (2009). Experimental investigation of optimum thermohydraulic performance of solar air heaters with metal rib grits roughness. *Solar Energy*, 83, 6–13.
- Layek, A., Saini, J. S., Solanki, S. C. (2007). Second law optimization of a solar air heater having chamfered rib–groove roughness on absorber plate. *Renewable Energy*, 32, 1967–1980.
- Sureandhar, G., Srinivasan, G., Muthukumar, P., Senthilmurugan, S. (2021). Performance analysis of arc rib fin embedded in a solar air heater. *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, 100891.
- Espinosa, G., Ibáñez, G., López, A., Lastres, O., Reyes-Nava, J., Pantoja, J. (2023). Unsteady numerical modeling, experimental validation and optimization of a solar air heater based on the second law of thermodynamics using genetic algorithm. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 7163–7183.

Anexos

Anexo 1. Configuraciones rugosas con sus respectivas correlaciones

Autor	Geometría de rugosidad	Correlación	Valores óptimos
Bhushan y Singh (2011)	Protuberancias	$Nu = 2.1 \times 10^{-88} * Re^{1.452} * \left(\frac{S}{e}\right)^{12.94} * \left(\frac{L}{e}\right)^{99.2} * \left(\frac{d}{D}\right)^{-3.9} * \exp \exp \left[(-10.4) \left\{ \log \log \left(\frac{S}{e}\right)^2 \right\} \right] *$	$\frac{S}{e} = 31.25$
		$\exp \exp \left[(-77.2) \left\{ \log \log \left(\frac{L}{e}\right)^2 \right\} \right] * \exp \exp \left[(-7.83) \left\{ \log \log \left(\frac{d}{D}\right)^2 \right\} \right]$	$\frac{L}{e} = 31.25$
		$f = 2.32 * Re^{-0.201} * \left(\frac{S}{e}\right)^{0.383} * \left(\frac{L}{e}\right)^{-0.484} * \left(\frac{d}{D}\right)^{0.133}$	$\frac{d}{D} = 0.294$
		$Nu = 8.532 \times 10^{-3} * Re^{0.932} * \left(\frac{e}{D}\right)^{0.175} * \left(\frac{W}{w}\right)^{0.506} * \left(\frac{G_d}{L_v}\right)^{-0.0348} * \left(\frac{g}{e}\right)^{-0.0708} * \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.0239}$	$\frac{e}{D} = 0.043$
Kumar et al. (2013)	Nervadura en V múltiple con un espacio	$* \left(\frac{P}{e}\right)^{1.1196} * \exp \exp \left[(-0.0753) \left\{ \ln \ln \left(\frac{W}{w}\right)^2 \right\} \right] *$	$\frac{W}{w} = 6$
		$\exp \exp \left[(-0.0653) \left\{ \ln \ln \left(\frac{G_d}{L_v}\right)^2 \right\} \right] * \exp \exp \left[(-0.223) \left\{ \ln \ln \left(\frac{g}{e}\right)^2 \right\} \right] *$	$\frac{G_d}{L_v} = 0.69$
		$\exp \exp \left[(0.1153) \left\{ \ln \ln \left(\frac{\alpha}{60}\right)^2 \right\} \right] * \exp \exp \left[(-0.2805) \left\{ \ln \ln \left(\frac{P}{e}\right)^2 \right\} \right]$	$\frac{g}{e} = 1$
			$\alpha = 60$
			$\frac{P}{e} = 10$

$$f = 3.1934 * Re^{-0.3151} * \left(\frac{e}{D}\right)^{0.268} * \left(\frac{W}{w}\right)^{0.1132} * \left(\frac{G_d}{L_p}\right)^{0.0610} * \left(\frac{g}{e}\right)^{-0.1769} * \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{0.1553} * \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.7941} *$$

$$\exp \exp \left[(0.0974) \left\{ \ln \ln \left(\frac{W}{w} \right) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.1065) \left\{ \ln \ln \left(\frac{G_d}{L_p} \right) \right\}^2 \right] *$$

$$\exp \exp \left[(-0.6349) \left\{ \ln \ln \left(\frac{g}{e} \right) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.1527) \left\{ \ln \ln \left(\frac{\alpha}{60} \right) \right\}^2 \right] *$$

$$\exp \exp \left[(0.1486) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p}{e} \right) \right\}^2 \right]$$

Sethi et al. Hoyuelos
(2012)

$$Nu = 7.1 \times 10^{-3} * Re^{1.1386} * \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.3629} * \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.047} * \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.0048} *$$

$$\frac{e}{D_h} = 0.036$$

$$\frac{p}{e} = 10$$

$$\alpha = 60$$

$$\exp \exp \left[(-0.7792) \left\{ \ln \ln \left(\frac{\alpha}{60} \right) \right\}^2 \right]$$

$$f = 4.869 \times 10^{-1} * Re^{-0.223} * \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.2663} * \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.059} * \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{0.0042} *$$

$$\exp \exp \left[(-0.4801) \left\{ \ln \ln \left(\frac{\alpha}{60} \right) \right\}^2 \right]$$

(Alam et al, Deflectores
2014) perforados en
V

$$Nu = 0.0135 * Re^{0.815} * \left(\frac{e}{H}\right)^{-0.1215} * \left(\frac{P}{e}\right)^{1.8368} * \beta^{-0.2345} * \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{-0.0233} * \psi^{-0.6379} *$$

$$\frac{e}{H} = 0.8$$

$$\frac{P}{e} = 8$$

$$\beta = 0.1$$

$$\alpha = 60$$

$$\psi = 0.69$$

$$\exp \exp \left[(-0.9105) \left\{ \ln \ln \left(\frac{e}{H} \right) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.4555) \left\{ \ln \ln \left(\frac{P}{e} \right) \right\}^2 \right] *$$

$$\exp \exp \left[(-0.0714) \left\{ \ln \ln (\beta) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.2761) \left\{ \ln \ln \left(\frac{\alpha}{60} \right) \right\}^2 \right] *$$

$$\exp \exp \left[(-0.9680) \left\{ \ln \ln (\psi) \right\}^2 \right]$$

Baissi et al. (2020)	Generador de vórtices en forma de delta curvado con deflectores no perforados	$f = 0.4613 * Re^{-0.0942} * \left(\frac{e}{H}\right)^{1.3377} * \left(\frac{p_t}{e}\right)^{-0.267} * \beta^{-0.195} * \left(\frac{\alpha}{60}\right)^{0.0017} * \psi^{-0.4336} *$ $\exp \exp \left[(0.7097) \left\{ \ln \ln \left(\frac{e}{H} \right) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.2973) \left\{ \ln \ln \left(\frac{\alpha}{60} \right) \right\}^2 \right] *$ $\exp \exp \left[(-0.6160) \left\{ \ln \ln (\psi) \right\}^2 \right]$	$\frac{p_t}{e} = 3$ $\frac{p_t}{b} = 0.6$
Singh y Varun (2014)	Arco múltiple	$Nu = 1.0496 * Re^{0.475} * \left(\frac{p_t}{e}\right)^{0.9894} * \left(\frac{p_t}{b}\right)^{-0.3201} * \exp \exp \left[(-0.5426) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p_t}{e} \right) \right\}^2 \right]$ $f = 0.2572 * Re^{-0.0981} * \left(\frac{p_t}{e}\right)^{2.4651} * \left(\frac{p_t}{b}\right)^{-0.5622} * \exp \exp \left[(-1.3716) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p_t}{e} \right) \right\}^2 \right] *$ $\exp \exp \left[(-0.2669) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p_t}{b} \right) \right\}^2 \right]$ $Nu = 1.564 \times 10^{-4} * Re^{1.343} * \left(\frac{e}{D}\right)^{0.048} * \left(\frac{W}{w}\right)^{0.407} * \left(\frac{p}{e}\right)^{0.572} * \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{-0.355} *$ $\exp \exp \left[(-0.099) \left\{ \ln \ln \left(\frac{W}{w} \right) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.148) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p}{e} \right) \right\}^2 \right] *$ $\exp \exp \left[(-0.272) \left\{ \ln \ln \left(\frac{\alpha}{90} \right) \right\}^2 \right]$ $f = 0.063 * Re^{-0.16} * \left(\frac{e}{D}\right)^{0.102} * \left(\frac{W}{w}\right)^{0.277} * \left(\frac{p}{e}\right)^{0.562} * \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{0.023} * \exp \exp \left[(-0.140) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p}{e} \right) \right\}^2 \right]$ $* \exp \exp \left[(-0.013) \left\{ \ln \ln \left(\frac{\alpha}{90} \right) \right\}^2 \right]$	$\frac{e}{D} = 0.045$ $\frac{W}{w} = 5$ $\frac{p}{e} = 8$ $\alpha = 60$
Skullong y Promvongse (2014)	Generador de vórtice de ala en delta	$Nu = 0.173 * Re^{0.751} * Pr^{0.4} * \left(\frac{b}{H}\right)^{0.893} * \left(\frac{b}{H} + 1\right)^{2.296}$ $f = 0.417 * Re^{-0.009} * \left(\frac{b}{H} + 1\right)^{2.296}$	$\alpha = 30$ $\frac{b}{H} = 0.4$

Alam y Kim (2017)	Protuberancia cónica	$Nu = 2.29 \times 10^{-4} * Re^{0.984} * \left(\frac{e}{D}\right)^{0.280} * \left(\frac{p}{e}\right)^{4.085} * \exp \exp \left[(-0.922) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p}{e}\right) \right\}^2 \right]$ $f = 2.19 \times 10^4 * Re^{-0.352} * \left(\frac{e}{D}\right)^{5.839} * \left(\frac{p}{e}\right)^{1.860} * \exp \exp \left[(0.739) \left\{ \ln \ln \left(\frac{e}{D}\right) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.523) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p}{e}\right) \right\}^2 \right]$	$\frac{e}{D} = 0.044$ $\frac{p}{e} = 10$
Mahanand y Senapati (2021)	Rugosidad de un cuarto de círculo	$Nu = 0.0341 * Re^{0.884} * \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.1293} f = 0.5953 * Re^{-0.3194} * \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.0985}$	$\frac{p}{e} = 7.14$
Yadav et al. (2021)	Nervaduras circulares	$Nu = 0.0361 * Re^{0.8130} * \left(\frac{p}{e}\right)^{0.1360} * \exp \exp \left[(-0.0387) \left\{ \ln \ln \left(\frac{p}{e}\right) \right\}^2 \right]$ $f = 0.4845 * Re^{-0.2745} * \left(1 + \frac{p}{e}\right)^{-0.2245}$	$\frac{p}{e} = 0.042$
Ngo y Phu (2020)	Perfiles de curvas cónicas	$Nu = 0.0152703 * Re^{0.898047} * abs(K)^{0-0.023995}$ $f = 0.0252542 * Re^{-0.0407643882} * abs(K)^{-0.0182465}$	$K = -4$
Patel et al. (2020)	Perfil inverso NACA 0040	$Nu = 0.009016 * Re^{0.526} * \left(\frac{e}{D}\right)^{-3.1354} * \exp \exp \left[(-0.5834) \left\{ \ln \ln \left(\frac{e}{D}\right) \right\}^2 \right]$ $f = 0.32449 * Re^{1.3728} * \left(\frac{e}{D}\right)^{5.6236} * \exp \exp \left[(-0.0875) \left\{ \ln \ln (Re) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(0.943) \left\{ \ln \ln \left(\frac{e}{D}\right) \right\}^2 \right]$	$\frac{e}{D} = 0.065$
Karmare y Tikekar (2009)	Diferente aspereza de nervaduras de metal	$Nu = 2.4 \times 10^{-3} * Re^{1.3} * \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.42} * \left(\frac{l}{s}\right)^{-0.146} * \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.27}$ $f = 15.55 * Re^{-0.26} * \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.91} * \left(\frac{l}{s}\right)^{-0.27} * \left(\frac{p}{e}\right)^{-0.51}$	$\frac{e}{D_h} = 0.035$ $\frac{l}{s} = 1.72$

Layek et al. (2007)	Ranuras achaflanadas	$Nu = 0.0028 * Re^{0.93} * \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.528} * \left(\frac{P}{e}\right)^{2.17} * \left(\frac{g}{P}\right)^{-1.054} * \phi^{0.77} * \exp \exp [(-0.138) \{ \ln \ln (\phi) \}^2] *$	$\frac{P}{e} = 17.5$ $\frac{e}{D_h} = 0.03$
		$\exp \exp \left[(-0.57) \left\{ \ln \ln \left(\frac{P}{e} \right) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.649) \left\{ \ln \ln \left(\frac{g}{P} \right) \right\}^2 \right]$	$\frac{P}{e} = 6$ $\frac{g}{P} = 0.4$ $\phi = 18$
		$f = 0.00276 * Re^{-0.1279} * \left(\frac{e}{D_h}\right)^{0.3632} * \left(\frac{P}{e}\right)^{4.255} * \left(\frac{g}{P}\right)^{-0.976} * \exp \exp [(0.00575\phi)] *$	
		$\exp \exp \left[(-1.066) \left\{ \ln \ln \left(\frac{P}{e} \right) \right\}^2 \right] * \exp \exp \left[(-0.583) \left\{ \ln \ln \left(\frac{g}{P} \right) \right\}^2 \right]$	
Surendhar et ál. (2021)	Nervadura de arco	$Nu = 0.001047 * Re^{1.386} * \left(\frac{e}{D_e}\right)^{0.3772} * \left(\frac{\alpha_a}{90}\right)^{-0.1198}$	$\frac{e}{D_e} = 0.0422$
		$f = 0.14408 * Re^{-0.17103} * \left(\frac{e}{D_e}\right)^{0.1765} * \left(\frac{\alpha_a}{90}\right)^{0.1185}$	$\alpha_a = 30$

Energías renovables: generación, distribución, almacenamiento y su impacto en los países en desarrollo.

Se terminó de editar en junio de 2025

en los talleres de Astra Ediciones

Av. Acueducto No. 829

Colonia Santa Margarita, C. P. 45140

Zapopan, Jalisco, México.

33 38 34 82 36

E-mail: edicion@astraeditorial.com.mx

www.astraeditorialshop.com

Este libro proporciona una plataforma para el intercambio de conocimientos, reflexiones y propuestas que promuevan una transición energética en los países en desarrollo inclusiva y sostenible. Al explorar temas que van desde tecnologías de generación emergentes y sistemas eficientes, hasta consideraciones políticas y sociales, Energías Renovables: Generación, Distribución, Almacenamiento y su Impacto en los Países en Desarrollo, se convierte en una referencia esencial para investigadores, tomadores de decisiones y todos aquellos interesados en construir un futuro energético más limpio y equitativo.

Los editores y autores que han contribuido a esta obra esperan que inspire a sus lectores en la búsqueda de soluciones prácticas, fomente el diálogo interdisciplinario y, sobre todo, motive acciones concretas para enfrentar los retos energéticos de nuestra época, y así construyamos juntos las bases para un desarrollo sostenible.

***Dr. Francisco Ernesto Navarrete Báez y
Dra. Belkis Sulbarán Rangel***

ISBN: 979-13-87837-05-1



Consulta y descarga

