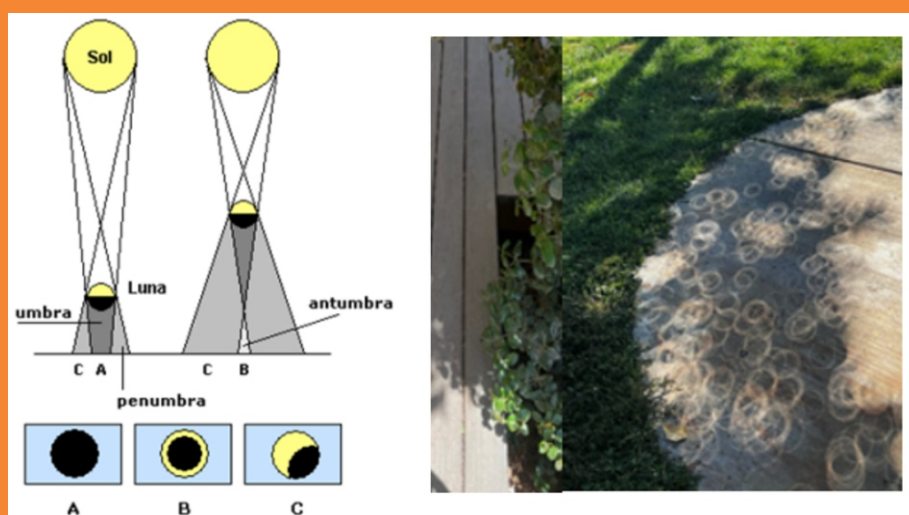


geos



GEOS se publica dos veces al año patrocinada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y editada conjuntamente por la UGM y el CICESE.

UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. Mesa Directiva 2024-2025

Dr. José Luis Macías Vázquez
Instituto de Geofísica, UNAM
Presidente

Dr. Américo González Esparza
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidente

Dr. Mario González Escobar
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Tesorero

Dr. Antonio Pola Villaseñor
ENES Morelia
Secretario General

Dra. Lucia Capra Pedol
Centro de Geociencias, UNAM
Secretaria de Investigación

Dra. Avith Mendoza Ponce
IIGERCC, UNICACH
Secretaria de Difusión

Dr. Óscar Castro Artola
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretario de Educación

Dra. Elva Escobar
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
Secretaria de Vinculación

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Avith Mendoza Ponce
avith.mendoza@unicach.mx
UNICACH

Comité Editorial

Harald Böhnelt, UNAM
Noel Carbajal Pérez, IPICYT
Carlos Flores Luna, CICESE
Efraín Gómez Arias, CICESE
Felipe Escalona, UAZ

Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez
Angel Daniel Peralta Castro
Sergio Manuel Arregui Ojeda
María Cristina Álvarez Astorga

GEOS, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana (UGM), se edita conjuntamente por la UGM y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) bajo el patrocinio del CICESE. Se publica dos veces al año, contiene artículos originales, artículos de divulgación, notas cortas, aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM. Las instrucciones para los autores se encuentran al final de cada número y en <http://www.ugm.org.mx/geos.html>

GEOS (ISSN 0186-1891) se edita en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

Dirigir toda correspondencia a:
Editorial GEOS
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
ldelgado@cicese.mx
Tel. en Ensenada B.C.: (646)175-0500, Ext. 26060

Título: GEOS

Periodicidad: semestral

ISSN: 0186-1891

Editado en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carret. Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

EDITORIAL

Crecimiento económico y desarrollo socioambiental	... 209
Eficiencia Térmica Industrial en Iberoamérica	... 211

DIVULGACIÓN

Eclipse, umbra, penumbra y antumbra: La XXVI Olimpiada de Ciencias de la Tierra Enrique Gómez Treviño	... 213
Análisis de la actividad sísmica en el noroeste de México durante el periodo de julio 2023 a julio 2024 María Alejandra Nuñez Leal, Oscar Alberto Castro Artola, Luis Alejandro Yegres Herrera, Carlos Eduardo Reinoza Gómez, Francisco Javier Farfán Sánchez, Rogelio Arce Villa, Sergio Manuel Arregui Ojeda, Rogelio Ojeda Arechiga	... 229

ENERGÍA

Diagnóstico energético para el Liceo Técnico Profesional El Sauce de Talca Franco Gallardo, Hugo Valdés	... 237
Diseño y construcción de un prototipo de evaporador solar para deshidratación de lactosuero Ricardo Musule Lagunes, Jorge Arturo del Ángel Ramos	... 253
Pobreza energética en Latinoamérica: Un análisis desde diversas perspectivas Juan Peralta Jaramillo, Emérita Delgado Plaza	... 265
Modelos cinéticos de secado en biomasa con corriente de aire Ignacio Gandia, Isabel López Cortes, Borja Velázquez Martí	... 275

Continuación

- Bioenergía y desarrollo sostenible: Alternativas en la producción de biocombustibles** ... 291
Carmina Reyes Plascencia, Kiby Mora, Néstor Tancredi

- Implicaciones de la Integración de Energías Renovables Intermitentes a la Red Eléctrica** ... 311
Ian Sosa Tinoco, Clarissa Acosta Campas, Gustavo Nieves Monarrez, Melissa Navarro Robles, Mario Susuki Valenzuela

- Rumbo a los Sistemas Híbridos que utilizan el Motor Stirling** ... 323
Germán Rodríguez Sosa, Mario F. Suzuki Valenzuela, Pablo Alberto Limón Leyva, Ian Sosa Tinoco

COMUNICACIONES

- POLITICA EDITORIAL** ... 337

Crecimiento económico y desarrollo socioambiental

Cada año el clima parece ser más severo que el anterior. Así lo sugieren los incendios en Australia, el círculo polar Ártico, Europa, África Central, la Amazonia, los de Canadá de 2023 y California al iniciar 2025. En México, según datos de la CONAFOR, en 2020 la superficie quemada por los incendios forestales fue de 378,930 ha, mientras que en 2024 fue de 1,672,216 ha. Organizaciones como Greenpeace sostienen que el cambio climático alimenta los incendios forestales y que las actividades humanas son responsables de la gran mayoría. No es ocioso decir que el clima es un indicador importante de la salud del planeta y que el equilibrio está claramente amenazado por la contaminación del aire, el suelo y el agua. Los grandes proyectos productivos y de infraestructura que incluyen la extracción de recursos naturales como los combustibles fósiles, rocas, minerales, agua y biomasa deben vigilarse meticulosamente, ya que la modificación de extensas áreas consideradas frágiles, incrementa la vulnerabilidad y el riesgo. También conviene aplicar esta vigilancia al crecimiento urbano, el cual avanza comúnmente hacia terrenos inadecuados y potencialmente peligrosos, o bien, desatiende tanto las normas de construcción y hace uso de materiales inapropiados. Además, el desarrollo de las sociedades busca su crecimiento económico a partir de la producción de bienes que involucran el uso creciente de materiales contaminantes, tales como algunos fertilizantes, pesticidas y plásticos. A lo anterior se suma la extracción desmedida de recursos naturales, principalmente de agua, y el cambio indiscriminado de uso del suelo. Igualmente, en estos tiempos de destrucción derivada de los hechos de guerra, los requerimientos de materiales pétreos y metálicos utilizados para esas acciones, así como los que se necesitarán para la reconstrucción, aumentarán sensiblemente la presión extractiva de recursos naturales diversos.

En un esquema distinto de percepción social se encuentra el sistema alimentario, cuya contribución al desequilibrio ambiental es posiblemente más difícil de estimar. Aquí es interesante observar que, según la FAO, el 3 por ciento de los grandes propietarios poseen el 74 por ciento de la superficie destinada a la actividad agropecuaria y son, además, quienes en mayor medida utilizan el modelo agroindustrial que incide en el medio ambiente de forma importante. Por ejemplo, el sector ganadero es responsable de gran parte de la deforestación al ampliar los pastizales para el ganado que de forma colateral expiden metano a la atmósfera, un gas de efecto invernadero que también contribuye perceptiblemente al aumento de la temperatura. Se estima que ya se ha usado casi el 50 por ciento del capital forestal del planeta, el principal consumidor de CO₂ y pieza básica en el ciclo del agua.

Actualmente, la explotación de recursos naturales, minerales y de combustibles fósiles está tomando un rumbo poco deseable que habría de abordar de manera cuidadosa. Aunque las mineras cumplen con la normatividad aplicable y realizan obras en beneficio de las comunidades, su actividad no siempre es bien vista por la población, grupos ambientalistas y políticos, principalmente cuando se trata de minería a cielo abierto. Más del 60 por ciento de la extracción minera utiliza ese método, el cual ha generado numerosos conflictos socio-ambientales pues con frecuencia acarrea riesgos ambientales y de protección civil por las grandes dimensiones de las obras, por la cantidad de agua requerida y por las sustancias usadas para beneficiar los materiales. Un caso especial se observa en el ambiente marino porque se desconoce el impacto que la minería submarina puede causar a los ecosistemas y su entorno. Por ejemplo, la compañía Odyssey Marine Exploration, empresa estadounidense dedicada a la explotación de los restos de hundimientos de barcos, propone dragar el piso del Golfo de Ulloa en el Pacífico de Baja California Sur para explotar arena fosfática durante 50 años. El fosfato es utilizado para la producción de ciertos fertilizantes, pero al estrato rico en fosfatos del Golfo de Ulloa, cuyo espesor varía entre 4 y 7 m, le sobreyacen capas de sedimentos de hasta 3 m de espesor que se retirarían. Los potenciales daños ambientales por la remoción del piso marino afectaría la fotosíntesis marina por la dispersión de los sedimentos removidos, además de que debe utilizarse agua dulce para limpiar las arenas, entre otras actividades. La aprobación de un proyecto de minería submarina en México sentaría un precedente para otros desarrollos, principalmente en áreas de fondos marinos internacionales.

Finalmente, al tiempo que debemos pensar si no hemos rebasado los límites de crecimiento a partir de la explotación de recursos naturales, de acuerdo con distintas organizaciones, como Greenpeace, necesitamos aventurarnos por la economía circular y buscar la forma de recuperar y reciclar, sobre todo los metales y las sustancias que se desechan.

Eficiencia Térmica Industrial en Iberoamérica

El Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) se organiza según un modelo descentralizado, cuyo marco institucional lo componen los organismos responsables de la política científica y tecnológica (ONCYT) de los 21 países participantes. Cada ONCYT es responsable de la gestión del Programa en su país y participa con un representante en los órganos de dirección del CYTED. La Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, antes CONAHCYT) es el órgano representante de México (ONCYT) ante el CYTED. En 2019 fue sometido el proyecto “Red Iberoamericana de Eficiencia Térmica Industrial RIETI (número de registro 720RT0015; <https://cyted.org/rieti>)”. La RIETI está integrada por un consorcio de 98 investigadores de universidades públicas, centros e institutos de investigación de nueve países iberoamericanos y dos europeos (Ecuador, México, Perú, Uruguay, Paraguay, Honduras, Chile, Nicaragua, Argentina, Portugal y España), siendo Ecuador el país anfitrión y cede de la RIETI.

El objetivo general de la red es “Fortalecer la cooperación regional por medio del desarrollo de instrumentos y herramientas que permita la gestión del conocimiento técnico, capacitación, promoción e integración de criterios de eficiencia energética en el sector industrial y los grupos que integran la red temática, contribuyendo así con la mitigación del cambio climático y la reducción de la huella de carbono en nuestros países de manera sostenible”. En 2023, se llevó a cabo el Simposio Iberoamericano Eficiencia y Tecnología Térmica e Impacto en La Huella de Carbono en el Sector Industrial en la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, en Tegucigalpa. En la reunión de trabajo con los representantes de los once países, se acordó impulsar la elaboración de reportes asociados a casos de estudio, tecnologías térmicas, mecanismos de incentivos y normas existentes en los países participantes, con el fin de contribuir con instrumentos de apoyo para el desarrollo de las políticas locales, regionales y/o nacionales asociadas a la eficiencia energética y reducción de la huella de carbono. Derivado de esta iniciativa, los investigadores Dr. Efraín Gómez Arias (CICESE, México), Dra. Emerita Delgado Plaza (ESPOL, Ecuador) y la Dra. Carmina Reyes Plascencia (UNILAR, Uruguay), coordinaron la edición de ocho artículos científicos y de divulgación en la Revista GEOS (Unión Geofísica Mexicana-CICESE), enfocados en temas prioritarios de interés internacional sobre Energía, Pobreza Energética, Energía y Desarrollo Sostenible, así como un caso de estudio acerca de la Integración de las Energías Renovables a las Redes de Eléctricas Locales. Con estas contribuciones esperamos que estos temas de investigación cautiven la atención de la audiencia académica nacional e internacional en áreas afines a las energías renovables.

Efraín Gómez Arias (CICESE, México), Emerita Delgado Plaza (ESPOL, Ecuador) y Carmina Reyes Plascencia (UNILAR, Uruguay)

Eclipse, umbra, penumbra y antumbra: la XXVI Olimpiada de Ciencias de la Tierra

Enrique Gómez Treviño

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica aplicada.

Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

egomez@cicese.mx

Presentación

En serio: ¿Será la Luna?

Gran oportunidad la del eclipse solar del 8 de abril de 2024. Experiencia inolvidable presenciar que algo estaba tapando al Sol y ese algo no eran las nubes. ¿Qué era entonces? Todos y en todas partes nos dicen que se trata de la Luna, pero en ningún momento del eclipse se vio a la Luna por ningún lado. Sin embargo ¿Alguien duda de que es la Luna la que oscurece al Sol? Seguramente nadie. Y sin embargo, a nadie le consta que era la Luna la que estaba tapando al Sol. No había Luna en el cielo, o al menos era invisible. Si nos quitamos el pre-juicio de la Luna, el fenómeno es un verdadero misterio. Sin embargo, cuando nos revelan que se trata de la Luna, el misterio desaparece, desaparecen las inquietudes y también las ganas de buscarle una explicación. Pasamos a ser cultos en un santiamén y con eso quedamos satisfechos. Sin darnos cuenta aceptamos que algo inexistente en el momento del eclipse es lo que oscurece al Sol. Nos comportamos como nuestros antepasados que creían que un dragón se comía al Sol. El nivel de comprensión que se nos ofrece es el mismo. Sin embargo, la diferencia es que nuestro escepticismo ya lo tuvieron otros en el pasado y lo resolvieron con más observaciones y razonamientos. Todo un proceso para llegar a la verdad, un camino largo y tedioso que a nadie le interesa ya. Sabemos la verdad pero ignoramos cómo llegar a ella. Aceptamos sin más lo de la Luna, aunque nunca la vimos acercarse al Sol. Es como aquello del niño en el cuento El traje nuevo del emperador de Christian Andersen. Nadie se atreve a decir lo que ve o no ve por temor a ser descubiertos. ¿Obvio que se trata de la Luna? Por supuesto, nadie lo duda.

Eclipse en el cielo y lunitas en el suelo

Lo anterior plantea un asunto que es y será siempre un reto para los planes educativos. La cuestión es el equilibrio entre enfatizar, por un lado, los procesos que llevan al conocimiento de algo, y por el otro, los conocimientos que son la culminación de esos procesos. Es el dilema de siempre. Otro ejemplo relacionado con el eclipse es el siguiente. Quienes presenciaron el eclipse bajo la sombra de un árbol, dicen que en el suelo se formaban pequeñas imágenes de lo que estaba pasando con el cielo. Algunos se referían a ellas como lunitas por su forma de media luna. Un detalle adicional que algunos observaron era que las imágenes en el suelo estaban al revés de lo que pasaba en el cielo. Si la parte izquierda del Sol era la oscura, en el suelo era la parte derecha. ¿Misterioso? Por supuesto que sí, pero el misterio desaparece cuando nos dicen que se trata del efecto de la cámara oscura. Nos quedamos en las mismas, porque no hay ninguna cámara ni algo que se le parezca. Tal vez sea porque es oscura y con el eclipse pues no se ve. Pero no importa, ya sabemos qué decir cuando alguien nos pregunte en el próximo eclipse por esas lunitas en el suelo. Y otra vez, se comprime en dos palabras –cámara oscura- una narrativa compleja que empieza con los antiguos griegos y se extiende hasta el Renacimiento, siendo nada más y nada menos que el origen de la cámara fotográfica. Sea como sea, el niño del cuento nos recordaría que ni hay cámara, ni es oscura.

Sol en el cielo y solecitos en el suelo

Para nuestra mala fortuna, el niño se nos puede aparecer mañana sin que haya eclipse. Nos podría preguntar si las imágenes del Sol se siguen formando en el suelo bajo los árboles. El hecho es que sí, las imágenes siempre han estado ahí pero nadie lo nota. Son imágenes perfectamente redondas, unas del tamaño de uvas bajo los arbustos, otras como naranjas y ocasionalmente como melones, dependiendo de la altura del árbol. No tienen la forma caprichosa de las aberturas en el follaje: son redondas o elípticas, dependiendo de la inclinación de la superficie donde se proyecten, y no son muy intensas porque las aberturas en el follaje son muy pequeñas. Una vez que se aprende a identificarlas se corre el riesgo de una adicción a buscarlas bajo cualquier árbol o arbusto. Ya no hay eclipse, pero ahí siguen todos los días sin que nadie las valore, esperando el próximo eclipse para volver a ser protagonistas.

Los ganadores

Primer lugar. Alumno: Russell Gael Adrián García Martínez; Profesor: José Antemio Cázares Ibarra; Escuela: COBACH, Plantel Rosarito. Segundo lugar. Alumno: Dominick Santiago Gómez Palacios; Profesor: Gabriela de la Selva Rubio; Escuela: COBACH, Plantel Tijuana Siglo XXI. Tercer lugar. Alumno: Cristian Rodrigo Ángel Dorantes; Profesor: José Antemio Cázares Ibarra; Escuela: COBACH, Plantel Rosarito.

Palabras clave: Eclipse solar; Umbra; Penumbra; Antumbra; Olimpiada de Ciencias de la Tierra

Eclipse, umbra, penumbra y antumbra. Guía para la XXVI Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California. Viernes 31 de mayo de 2024. Salón de usos múltiples del CICESE. Ensenada, Baja California.

Introducción

Los eclipses de Sol duran apenas unos minutos pero están presentes indirectamente en nuestras vidas todos los días. Por citar un ejemplo, en los sistemas de posicionamiento global (GPS) de los celulares. Otro ejemplo: en los globos flotantes que adornan las fiestas de cumpleaños. Y otro más: en las fotografías. ¿Cuál es la relación en cada caso? Hacia el final de la guía se darán más pistas. Por ahora revisaremos un concepto de geometría muy antiguo y muy simple. Todos lo manejamos a diario y a todas horas cuando inconscientemente estimamos distancias y tamaños de objetos a nuestro alrededor. Matemáticamente se expresa simplemente como la división de una distancia entre otra. Se utilizará más adelante para predecir si un eclipse será total o de otro tipo.

Comenzamos por desmentir el dicho popular de que no se puede tapar el Sol con un dedo, porque de hecho sí se puede. Basta con acercar un dedo lo suficiente al ojo para tapar el Sol. Y lo mismo pasa en un eclipse. El diámetro de la Luna es muchas, muchísimas veces más pequeño que el del Sol, y sin embargo lo eclipsa porque se encuentra mucho más cerca de la Tierra. Una cosa compensa a la otra. Los antiguos griegos que todo lo reducían a fórmulas matemáticas entendían esta compensación diciendo que ambos objetos, el cercano y el lejano, tienen el mismo tamaño angular como se muestra en la Figura 1a. Dada una abertura entre las líneas rectas el arco que subtiende la abertura es mayor en el círculo de mayor radio. Viendo los arcos desde el centro del círculo el más pequeño eclipsará exactamente al más grande. De hecho, un arco de un milímetro muy cerca del centro eclipsaría al arco mayor. Este tipo de observaciones llevaron a los griegos a identificar que dividiendo la longitud de un arco entre el radio del círculo que le corresponde da siempre lo mismo sin importar el tamaño del círculo. Esta división o razón del arco al radio caracteriza la abertura o ángulo que forman las dos rectas. Según esta definición, el ángulo α no tiene dimensiones porque se divide una

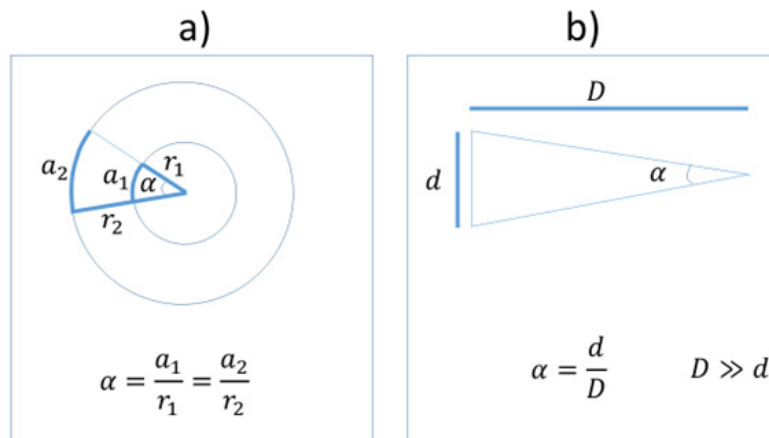


Figura 1. a) Definición de ángulo en radianes. b) Aproximación para ángulos pequeños.

longitud entre otra longitud. Sin embargo, por conveniencia se dice que el ángulo tiene unidades de radianes para distinguirlo de la otra convención en que se utilizan grados. Esta otra convención viene de Babilonia hoy Irak donde en lugar de utilizar una base de 10 como lo hacemos ahora utilizaban una base de 60. Su influencia está presente entre nosotros en que aún dividimos un ángulo de 1 grado en 60 minutos y un minuto en 60 segundos. Y lo mismo dividimos una hora en 60 minutos y un minuto en 60 segundos. Por otro lado, la vuelta completa en un círculo corresponde a 360 (60×6) grados lo cual equivale al valor de 2π radianes. Esto es porque la circunferencia de un círculo de radio r es $2\pi r$, la cual al dividirla por r nos da el valor de 2π . Esto nos lleva a que la razón $360/2\pi$ debe ser igual a la razón α_g/α_r , donde α_g es cualquier ángulo en grados y α_r el correspondiente ángulo en radianes. Multiplicando la igualdad en ambos lados por α_r sigue siendo una igualdad pero ahora mucho más útil porque el término $(\alpha_g/\alpha_r)\alpha_r$ es simplemente α_g . El resultado es la fórmula para pasar de radianes a grados. En algunas situaciones como es el caso de los eclipses es muy fácil calcular tamaños angulares en radianes. Cuando el tamaño angular es pequeño se puede reemplazar el arco por una recta como se muestra en la Figura 1b. El tamaño angular del Sol y de la Luna en radianes se pueden calcular conociendo sus diámetros y distancias a la Tierra y luego expresarlo en grados que es la unidad más familiar.

UMBRA, PENUMBRA Y ANTUMBRA

La Figura 2 tomada de Wikipedia muestra un esquema de la Luna y el Sol en dos situaciones, a la izquierda la Luna está muy cerca de la Tierra la cual está representada por la línea horizontal. Salen dos líneas de cada lado del Sol que a su vez pasan por ambos lados de la Luna. Estas líneas definen dos tipos de sombra, una más acentuada y la otra más tenue. A la primera la llaman umbra y a la segunda penumbra. A la derecha se presenta la misma situación pero la Luna está más alejada de la Tierra. En este caso las líneas que salen de los lados del Sol definen un tercer tipo de sombra al que llaman antumbra. Se representan con la letra A la umbra, con la B la antumbra y con la C a la penumbra. En la parte inferior de la Figura 2 se identifica a la A con un eclipse total de Sol, a la B con uno anular y a la C con uno parcial.

Para entender mejor el esquema tomado de Wikipedia es conveniente considerar otras situaciones como se ilustra en la Figura 3. La Figura 3a muestra cómo sería la sombra de la Luna sobre la Tierra si los rayos de luz del Sol fueran exactamente paralelos entre sí. La sombra sería del tipo umbra y su proyección sobre la Tierra sería del mismo tamaño que la luna, o sea de varios miles de kilómetros de diámetro. Sabemos que la sombra no es tan grande porque no cubrió al mismo tiempo ciudades tan cercanas como Mazatlán y Torreón que se encuentran a 400 km una de la otra. La Figura 1b muestra el

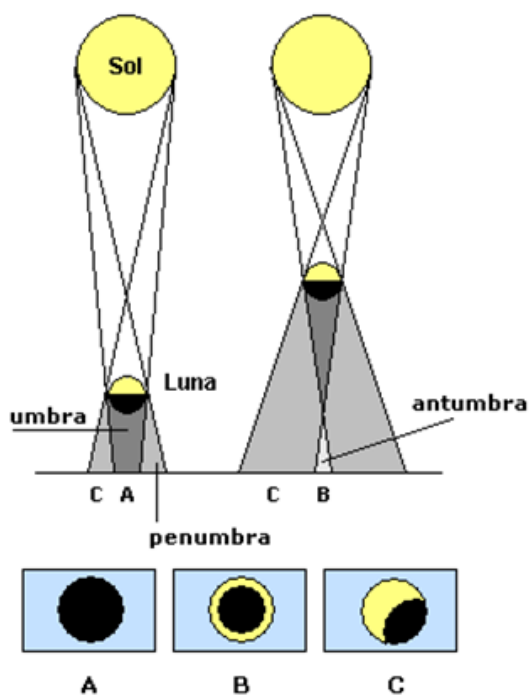


Figura 2. Esquema de un eclipse solar. Eclipse total A, eclipse anular B y eclipse parcial C. Ni las distancias ni los tamaños están a escala (Tomado de Wikipedia)

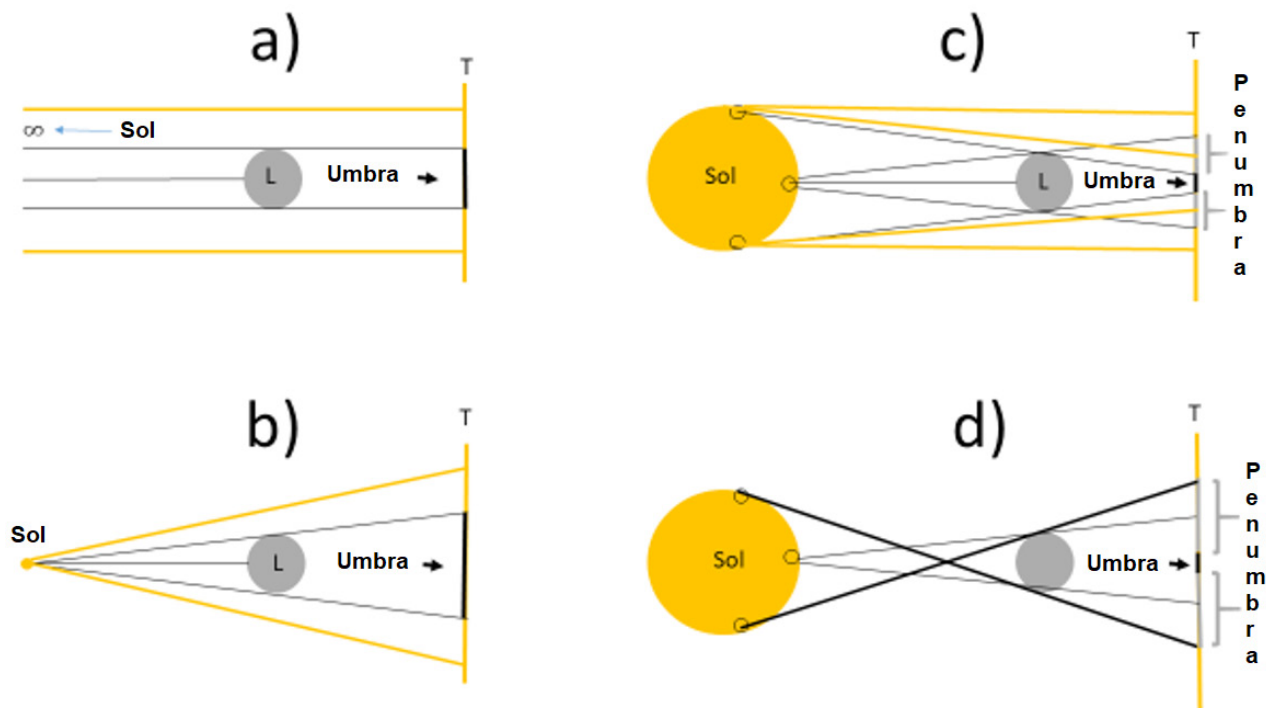


Figura 3. a) Sombra de la Luna en caso de rayos paralelos. b) Sombra de la Luna en caso de Sol pequeño y cercano. c) Formación de la penumbra debido a que el Sol es una fuente extendida. d) Crecimiento de la penumbra debido a fuentes opuestas.

caso de suponer que el Sol es muy pequeño y que está relativamente cerca de la Tierra y la Luna. La sombra en este caso sería mucho más grande que en el caso anterior por lo que tampoco este modelo explica lo que pasa en un eclipse real. En el eclipse del 8 de abril de 2024 Mazatlán estuvo en la umbra y Tijuana en la penumbra. Ninguna de las suposiciones mostradas en las Figuras 3a y 3b explica la penumbra, la zona medio oscura medio iluminada, y tampoco la antumbra que corresponde a un eclipse anular (anillo).

En la Figura 2 ni las distancias ni los tamaños están a escala. Tampoco los ángulos. En realidad los rayos son casi paralelos pero debido a las largas distancias es que se forman los conos. Dos rectas casi paralelas eventualmente convergen en un punto y a la vez, por el lado opuesto, se separan cada vez más. En el cuento El Escarabajo de Oro de Edgar Allan Poe escrito en 1843, el autor entremezcla varias ideas muy interesantes en la búsqueda del tesoro enterrado de un pirata famoso. Una de las ideas, la crucial para encontrar el tesoro, tiene que ver con el trazado de una línea recta desde el tronco de un árbol. Un pequeño error cerca del tronco lleva con la distancia al lugar equivocado. Para muchos críticos literarios es el mejor cuento del escritor. Tiene apenas cinco páginas y lo pueden encontrar en pdf en el Internet.

Recordarán que según se discutió en la olimpiada del año pasado Eratóstenes estimó el radio de la Tierra suponiendo que las rayos de luz del Sol llegaban paralelos a la Tierra porque el Sol se encuentra muy lejos. Si bien esta suposición es correcta para su problema no es aplicable al caso de los eclipses. Verán por qué. En la Figura 3c se representan rayos saliendo de diferentes partes del Sol. Los que salen de la parte central son obstruidos por la Luna resultando una sombra relativamente grande como la de la Figura 3b. Las líneas de color negro que salen de las partes superior e inferior delimitan una especie de cono de sombra cuyo diámetro se hace más pequeño al acercarse a la Tierra. Dentro de ese cono no se puede ver el Sol porque no llega luz ni de arriba ni del centro ni de abajo. Esta es la umbra: sombra total. La clave para entender la penumbra es la

línea amarilla que sale del polo superior y que pasa cerca del círculo que representa la Luna. Los rayos que representa esta línea iluminan la sombra grande de la Luna que definen los rayos que salen del ecuador del Sol. Esta zona está entonces oculta para una parte del Sol pero no para otra. O sea, está medio oscura y medio iluminada. Esta es la penumbra. Y lo mismo para la línea amarilla que sale del polo inferior, ahora iluminando la zona por debajo de la umbra. Pero esto no es todo, la penumbra se extiende todavía más hacia arriba y hacia abajo. Esto se ilustra en la Figura 3d donde las líneas gruesas que salen de los polos del Sol y pasan tangenciales a los polos opuestos de la Luna definen una nueva sombra. Pueden comprobarlo trazando rayos en cualquier dirección desde cualquier punto entre los polos del Sol. Las líneas oscuras delimitan una nueva sombra sobre un área que estaba iluminada. Como esta sombra se extiende más allá de la penumbra de la Figura 3c, a una zona que estaba iluminada entonces tendremos una nueva penumbra. Esto es, una zona de sombra que por otro lado también está iluminada.

La Figura 4 es una fotografía de un arreglo casero que muestra la formación de la umbra y la penumbra. En Internet podrán encontrar otras versiones del arreglo. En la fotografía el diámetro del círculo pequeño es 1 cm y el del grande es 3.7 cm. Tienen la misma proporción que los diámetros de la Luna y la Tierra por lo



Figura 4. Formación de umbra y penumbra utilizando materiales caseros.

que también pueden simular eclipses lunares. Sin embargo, se darán cuenta que es muy difícil simular a escala las distancias y también los tamaños si se incluye al Sol. Para esto necesitarán datos que están disponibles en Internet. Estos son: diámetros de la Tierra, la Luna y el Sol; distancias de la Tierra a la Luna y al Sol. Si la Luna se simula con un diámetro de 1 cm encontrarán que esto corresponde a un diámetro de la Tierra de 3.7 cm, como se mencionó anteriormente. Aplicando la misma regla encuentren cuál sería la distancia a escala entre la Tierra y la Luna, y entre la Tierra y el Sol, así como el tamaño del Sol. Ahora párense en la puerta de su casa con el círculo de 3.7 cm que representa la Tierra y pídasle a alguien que se coloque a la distancia que calcularon para la Luna. Lo que falta sería colocar a alguien a la distancia correspondiente al Sol con el círculo respectivo. Hacer los cálculos necesarios.

EL TAMAÑO ANGULAR

La Figura 2 implícitamente supone que estamos observando a la Tierra y también a la Luna y al Sol desde muy lejos. Sin embargo, nosotros todo lo vemos desde la Tierra por lo que es necesario completar el análisis en términos de los tamaños angulares del Sol y la Luna. Un eclipse total de Sol solo será posible si el tamaño angular de la Luna es mayor que el del Sol. Suponiendo que hay alineamiento de los tres astros existen cuatro escenarios posibles. La Figura 5a muestra el caso cuando los tamaños angulares de la Tierra y el Sol son exactamente iguales. El eclipse sería total pero duraría muy poco porque estaríamos en el vértice que define a la umbra y ésta se mueve rápidamente sobre la superficie. Para ser testigos del eclipse total las personas tendrían que hacer una fila de una sola línea a lo largo del trayecto de la umbra. En realidad el tamaño angular de la Luna fue un poco mayor que el del Sol en el eclipse del 8 de abril de este 2024. Esto no se debe a que el Sol se haya alejado, de hecho la distancia Tierra-Sol es prácticamente la misma. Es la distancia Tierra-Luna la que es menor que en el caso exacto según se muestra en la Figura 5b. En este caso la Tierra está dentro del cono que define a la umbra. Se puede apreciar que hay espacio de más para que el Sol se quede oculto sin tener que salir

inmediatamente de esa zona como en el caso del eclipse total exacto. Sucede lo contrario cuando la Luna se aleja más allá del caso exacto como se muestra en la Figura 5c. El tamaño angular de la Luna es menor que el del Sol por lo que no puede ocultarlo completamente, nos encontramos en la zona de antumbra. El máximo ocultamiento es cuando los círculos son concéntricos y la parte brillante forma un anillo, de allí el nombre de eclipse anular. Se puede calcular el porcentaje de oscuridad dividiendo el área oscura entre el área total del Sol y multiplicando por 100, de tal manera que una oscuridad del 100 % es un eclipse total, y un eclipse anular de un 90 % es que el área oscura es el 90 % del área total del Sol. Conociendo las distancias a la Luna y el Sol y sus diámetros se puede calcular este porcentaje. Por último, en la Figura 5d se muestra el caso de un eclipse parcial el cual corresponde a que la Tierra o el observador se encuentran en la zona de penumbra. Como se vio en relación con las Figuras 3c y 3d en la penumbra la Tierra está solo parcialmente oscura porque parte del Sol la sigue iluminando. Esto fue lo que pasó en Baja California en el eclipse pasado.

LOS MOVIMIENTOS DE LA LUNA

La Luna gira alrededor de la Tierra y no lo hace describiendo un círculo sino una elipse como se ilustra en la Figura 6a. O sea que su distancia a la Tierra no siempre es la misma. Además, la elipse gira sobre el plano de la eclíptica con un periodo de varios años de tal forma que los eclipses de Luna y de Sol no suceden siempre a las mismas distancias entre la Tierra y la Luna. En otras palabras, el tamaño angular de la Luna vista desde la Tierra varía en cierto porcentaje máximo que hace que los eclipses de Sol sean de un tipo o de otro.

¿Por qué no hay un eclipse cada mes? Esta pregunta surge en los medios cada vez que hay un eclipse. Es una pregunta válida y muy interesante. Que no haya eclipses cada mes significa que la elipse de la Figura 6a estuvo en el plano de la eclíptica solo ese día, el del eclipse. De hecho, el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra es una especie de espiral que cruza la eclíptica en una y otra dirección con cierta periodicidad. La

Figura 6b ilustra en perfil el ángulo de inclinación de la elipse. En el Internet podrán encontrar ilustraciones mejores tanto de la elipse como de su inclinación. Animaciones y videos son incluso más ilustrativos. De cualquier forma, estos son

los tres principales movimientos de la Luna, la elipse alrededor de la Tierra, la oscilación de su inclinación y la rotación de la elipse sobre la eclíptica.

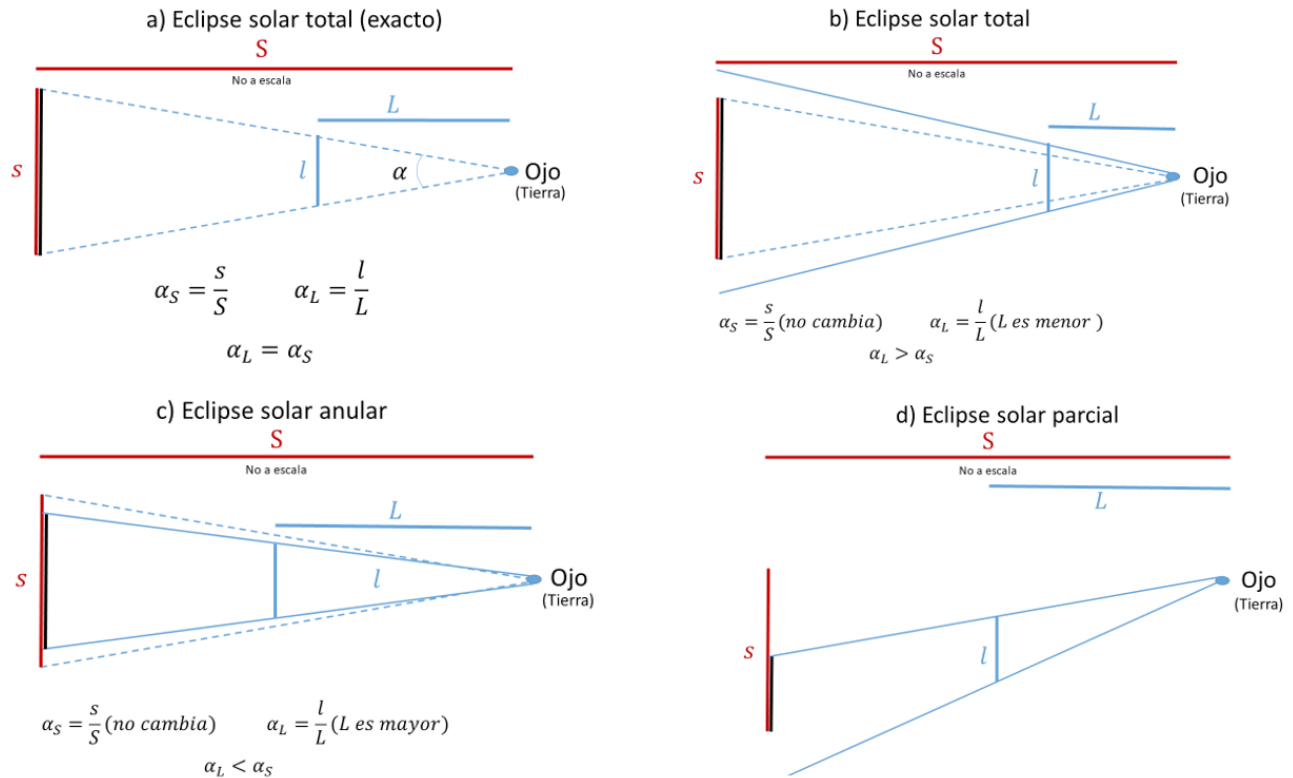


Figura 5. a) Los tamaños angulares del Sol y la Luna son exactamente iguales. b) El tamaño angular de la Luna es mayor que el del Sol. c) El tamaño angular del Sol es mayor que el de la Luna. d) Un eclipse parcial puede observarse tanto desde la penumbra como desde la antumbra.

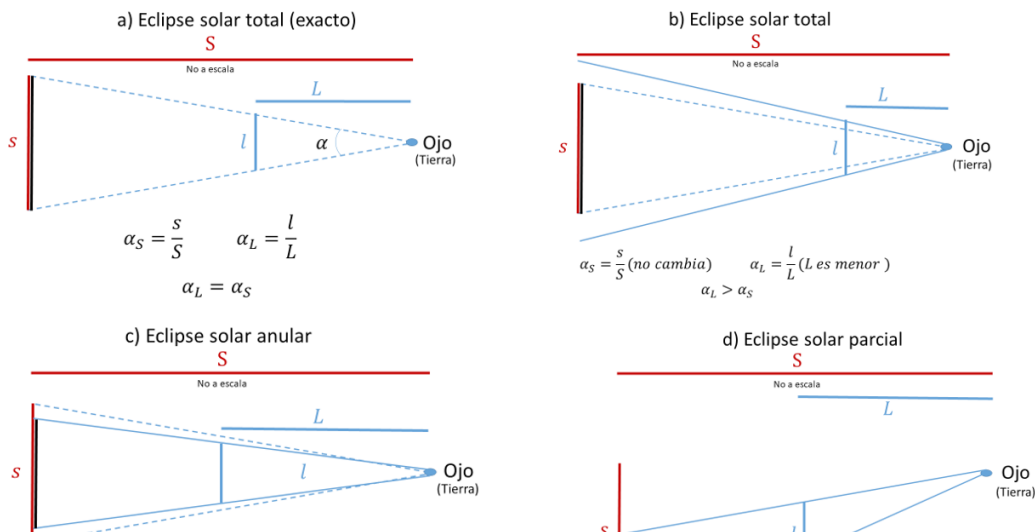


Figura 6. a) Trayectoria elíptica de la Luna alrededor de la Tierra. b) Inclinación de la elipse con respecto al plano de la eclíptica.

LOS ECLIPSES EN LA VIDA DIARIA

Es raro ver una sombra de un árbol completamente cerrada, en el sentido que no tenga aquí y allá pequeñas filtraciones de luz. Estas filtraciones no son simples rayos de luz: son imágenes detalladas y completas del Sol. Cada abertura pequeña entre las hojas hace una cámara oscura natural como las que se construyen con cajas de cartón para observar el eclipse. En la Figura 7 se muestran fotografías de las imágenes que se forman en el suelo durante eclipses recientes. Este fenómeno es poco conocido y a veces en los medios se le reporta como algo misterioso e incomprensible. Y es que casi nadie lo nota porque todos miramos hacia arriba y nadie piensa en acercarse a un árbol y mirar hacia abajo. En el Internet pueden encontrar más fotos y videos al respecto. También pueden encontrar cómo funciona una cámara oscura y desde cuándo y para qué se construían.

El tiempo transcurre más lento en la superficie de la Tierra que a 20,000 km de altura en donde transitan los satélites de los sistemas de

posicionamiento global (GPS). La diferencia es muy pequeña pero es suficiente para que los relojes en los satélites y en la Tierra pierdan sincronización y no tengamos la localización correcta. La corrección que se hace se basa en la Teoría de la Relatividad General de Einstein la cual se comprobó con una observación durante un eclipse solar. Buscar cómo, quién y cuándo se hizo esa observación.

Un elemento de la Tabla Periódica se descubrió en el Sol durante un eclipse solar varias décadas antes de que se encontrara en la Tierra. Buscar cuál, cómo, quién y cuándo.

ECLIPSES DE LUNA

Habrá algunas preguntas generales sobre la Luna y sobre eclipses de Luna. Pueden consultar la guía y el cuestionario de la olimpiada de 2011: Aristarco de Samos y la XVI Olimpiada de Ciencias de la Tierra. También habrá preguntas sobre el tránsito de planetas por el Sol.



Figura 7. La fotografía de la izquierda fue tomada por Carlos Flores Luna durante el eclipse solar del 8 de abril de 2024 en el jardín de la División de Ciencias de la Tierra del CICESE. En Baja California este eclipse fue parcial. La fotografía central muestra las imágenes del Sol cuando no hay eclipse. La fotografía de la derecha fue tomada por David Gerdes en Nuevo México durante el eclipse anular del 14 de octubre de 2023. El apilamiento de anillos cercanos se debe a que el viento mueve ligeramente la abertura.

Recomendaciones

Lean esta guía varias veces y hagan las observaciones recomendadas con la sombra de la estaca. Hagan sus propias versiones de las figuras de la guía a papel y lápiz para entenderlas mejor. Discutan entre ustedes y con sus maestros. Vean en YouTube videos al respecto, etc.

El examen

El examen consistirá de 50 preguntas y tendrá una duración máxima de 2 horas. Se recomienda traer calculadora.

Inscripciones

Es muy conveniente que se preinscriban a más tardar unos días antes del concurso, ya sea en forma individual o en grupo por correo electrónico, según se indica en esta página. Haciéndolo así nos permite planear mejor la cantidad de exámenes que debemos imprimir, etc.

Por lo general recibimos alrededor de 90 participantes. Aunque nunca hemos puesto límite, de ser necesario limitaremos a 100 el número de participantes. Habrá pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado. De 8:00 a 10:00 AM serán las inscripciones. A las 10:00 AM inicia el examen y se termina a las 12:01 PM. Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios incluyendo la red sísmológica donde se analizan las señales de los sismos que ocurren en Baja California y Sonora principalmente.

Las premiaciones se harán de 2:00 a 3:00 PM.

Saludos cordiales y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño.
Coordinador de las Olimpiadas

Las 50 preguntas del examen

1. La datos que se necesitan para diseñar un modelo a escala del sistema Tierra-Luna-Sol son: diámetro de la Luna 3,476 km, diámetro de la Tierra 12,742 km y diámetro del Sol 1,391,000 km. También se requiere la distancia media entre la Tierra y la Luna de 384,400 km y entre la Tierra y el Sol de 150,000,000 km. Si en un modelo a escala el diámetro de la Luna es 1 cm, el diámetro de la Tierra sería en cm

a) 3.7 b) 4.7 c) 5.7 d) 6.7

2. La distancia de la Tierra a la Luna en cm sería

a) 1.11 b) 11.1 c) 111 d) 1,110

3. El diámetro del Sol sería en metros

a) 1 b) 2 c) 3 d) 4

4. La distancia Tierra-Sol sería en metros

a) 4.32 b) 43.2 c) 432 d) 4,320

5. La fórmula para pasar de radianes (α_r) a grados (α_g) es

a) $\alpha_g = \alpha_r \cdot 180/\pi$ b) $\alpha_g = 180/\pi$

c) $\alpha_r = \alpha_g \cdot 2\pi/360$ c) $\alpha_r = \alpha_g \cdot \pi/180$

6. La fórmula para pasar de grados a radianes es

a) $\alpha_r = \alpha_g \cdot 180/\pi$ b) $\alpha_r = 180/\pi$

c) $\alpha_g = \alpha_r \cdot 2\pi/360$ d) $\alpha_r = \alpha_g \cdot \pi/180$

7. ¿Cuántos grados hay en un radián?

a) 60 b) 56.3 c) 57.3 d) 360

8. Calcular el tamaño angular del Sol desde la Tierra. Diámetro del Sol=1,391,000 km. Distancia Tierra-Sol=149,600,000 km. En grados el tamaño angular es

- a) 0.50 b) 0.51 c) 0.52 d) 0.53

9. Calcular el tamaño angular medio de la Luna. Diámetro de la Luna= 3,476 km. Distancia media Tierra-Luna=384,400 km. En grados el tamaño angular medio es

- a) 0.50 b) 0.51 c) 0.52 d) 0.53

10. Calcular el tamaño angular máximo de la Luna. Diámetro de la Luna=3,476 km. Distancia mínima Tierra-Luna=356,000 km. En grados el tamaño angular máximo es

- a) 0.55 b) 0.56 c) 0.57 d) 0.58

11. Calcular el tamaño angular mínimo de la Luna. Diámetro de la Luna=3,470 km. Distancia máxima Tierra-Luna=406,000 km. En grados el tamaño angular mínimo es

- a) 0.47 b) 0.48 c) 0.49 d) 0.50

12. Para que suceda un eclipse exacto se requiere que el tamaño angular de la Luna sea exactamente igual que el del Sol. ¿A qué distancia debería estar la Luna? La distancia en km es

- a) 375,783 b) 365,783
c) 355,783 d) 345,783

13. A la distancia mínima entre la Tierra y la Luna el tamaño angular de la Luna es mayor que el del Sol, por lo que sobra tamaño angular para que suceda un eclipse. Por lo tanto, un eclipse exacto sucederá cuando la Luna esté más alejada de la Tierra. ¿Cuál es la diferencia entre la distancia mínima y la distancia para que el eclipse sea exacto? La diferencia en km es de

- a) 5,000 b) 10,000 c) 15,000 d) 20,000

14. En la Luna hay espejos en los que se hacen reflejar rayos láser y se mide el tiempo que tardan en regresar a la Tierra. Con esto se mide con mucha exactitud la distancia a la Luna. Se ha encontrado que la Luna se aleja de la Tierra 4 cm por año. Con el tiempo, cuando se aleje hasta una distancia máxima para que sucedan eclipses totales, de ahí en adelante solo habrá eclipses parciales y anulares. Se puede calcular el número de años que faltan para que suceda esto. En millones de años este número es

- a) 5 b) 50 b) 500 d) 5,000

15. El alejamiento de la Luna se debe a las mareas las cuales a su vez hacen que la Tierra disminuya su velocidad de rotación con el tiempo. La duración del día se incrementa 3 milisegundos cada siglo. Tres milisegundos se pueden expresar como

- a) $1 \times 10^3 \text{s}$ b) $3 \times 10^1 \text{s}$
c) $1 \times 10^{-3} \text{s}$ d) $3 \times 10^{-3} \text{s}$

16. El incremento por año es de

- a) $1 \times 10^1 s$ b) $3 \times 10^{-5} s$
c) $3 \times 10^{-3} s$ d) $1 \times 10^{-2} s$

17. Por pequeño que sea el incremento por año, el efecto se acumula y en millones de años puede ser apreciable. Por ejemplo, en el tiempo que tarde la Tierra en alejarse a la distancia justo en que ya no podrá haber eclipses totales. Pasados esos millones de años un día durará mucho más. ¿Cuánto más?

- a) 150 s b) 1,500 s
c) 15,000 s d) 150,000 s

18. ¿Cuánto es esto en minutos?

- a) 2.5 b) 25 c) 250 d) 2,500

19. ¿Cuánto en horas?

- a) 1 b) 2 c) 3 d) 4

20. ¿Cuántas horas durará el día?

- a) 25 b) 26 c) 27 d) 28

21. La magnitud de un eclipse solar se define como la fracción máxima del diámetro solar cubierto por la Luna. Se especifica como la fracción máxima porque en sus inicios todos los eclipses, incluso los totales, empiezan por ser eclipses parciales. Un eclipse exacto tiene una magnitud de

- a) 1 b) 10 c) 100 d) 1000

22. El eclipse del 8 de abril de 2024 tuvo una magnitud

- a) =1 b) <1 c) >1 d) <<1

23. La magnitud de un eclipse lunar siempre es

- a) =1 b) <1 c) >1 d) <<1

24. Un eclipse total exacto (solar) dura muy poco, al tiempo que la Luna oscurece totalmente al Sol inmediatamente empieza a salir por el otro lado. El eclipse más corto sucedió en la Edad Media en febrero 3 del año 919. Duró 9 segundos. Generalmente se dice, redondeando los números, que los eclipses totales duran entre 10 s y 8 minutos. ¿Cuántas veces es mayor el más largo que el más corto? Redondeando

- a) 10 veces b) 8 veces
c) 5 veces d) 50 veces

25. La duración de un eclipse total es variable según la localización. Sin embargo, es más o menos uniforme a lo largo de muchos kilómetros. El eclipse del 8 de abril de 2024 en su paso por México duró

- a) 1 minuto b) 2 minutos
d) 3 minutos e) 4 minutos

26. Un eclipse solar total sucede cuando la Luna está en su fase de Luna

- a) llena b) cuarto creciente
c) nueva d) cuarto menguante

27. Un eclipse lunar sucede cuando la Luna está en fase de Luna

- a) llena b) cuarto creciente
c) nueva d) cuarto menguante

28. Una pregunta recurrente en los medios es por qué no hay un eclipse solar cada mes, uno en cada vuelta de la Luna alrededor de la Tierra. La respuesta es que el plano de la elipse que describe la Luna alrededor de la Tierra no está permanentemente en el plano de la eclíptica. De hecho solo pasa por ese plano en el día del eclipse en una oscilación angular que alcanza un ángulo máximo de

- a) 5° b) 4° c) 3° d) 2°

29. El periodo de esta oscilación es de

- a) 8 años b) 18 años
c) 28 años d) 38 años

30. La elipse que describe la Luna alrededor de la Tierra tiene además un movimiento de rotación sobre el plano de la eclíptica. Este movimiento es el principal responsable de que la distancia varíe entre la Tierra y la Luna, y por ende

de que un eclipse sea total o anular. El periodo de este movimiento es de

- a) 8 años b) 18 años
c) 28 años d) 38 años

31. Un eclipse total de Sol sucede en algún lugar de la Tierra cada

- a) medio año b) año y medio
c) dos años y medio d) tres años y medio

32. Un eclipse parcial de Sol sucede en algún lugar de la Tierra cada

- a) medio año b) año y medio
c) dos años y medio d) tres años y medio

33. Un eclipse total de Sol se repite en el mismo lugar de la Tierra aproximadamente cada

- a) 75 años b) 175 años
c) 275 años d) 375 años

34. La distancia Tierra-Luna en el eclipse de Sol del 8 de abril de 2024 fue de 359,389 km. ¿Cuál fue el tamaño angular de la Luna durante el eclipse? En grados

- a) 0.51 b) 0.53 c) 0.55 d) 0.58

35. El diámetro de la umbra en el eclipse del 8 de abril fue de

- a) 280 km b) 380 km c) 480 km d) 580 km

36. Suponer que la velocidad del sonido en el aire es de 334 m/s. Pasar a km/h. El equivalente es

- a) 300 km/h b) 600 km/h
c) 1,200 km/h d) 1,800 km/h

37. El eclipse del 8 de abril entró a México por Mazatlán, Sinaloa y salió por Piedras Negras, Coahuila. Las dos ciudades distan aproximadamente 1,000 km. Si en el país la umbra duró 20 minutos, calcular su velocidad. La velocidad de la umbra fue de

- a) 1,200 km/h b) 2,000 km/h
c) 3,000 km/h d) 4,000 km/h

38. La umbra viaja más rápido que el sonido. La razón de la velocidad de la umbra a la del sonido es

- a) 1.0 b) 1.5 c) 2.0 d) 2.5

39. Como los eclipses de Sol, los eclipses de Luna pueden ser de varios tipos. Sin embargo, hay un tipo de eclipse lunar que no puede ocurrir, por lo menos no por millones de años. El tipo de eclipse lunar que no puede ocurrir es

- a) total b) lunar c) anular d) parcial

40. La primera descripción de una cámara oscura la hicieron los antiguos griegos hace más de 2,000 años. Incluso se menciona que no importa la forma de la abertura con tal que sea pequeña

con respecto a la distancia a la pantalla o superficie iluminada. El que hizo la primera descripción fue

- a) Sócrates b) Platón
c) Pitágoras d) Aristóteles

41. No es necesario entender el funcionamiento de la cámara oscura para utilizarla. De hecho se sabe que algunos pintores famosos utilizaron cámaras oscuras para ayudarse en sus obras. No fue sino hasta 1604 que Kepler explicó su funcionamiento. La pequeña abertura funciona como un seleccionador de rayos según su dirección, los cuales llegan a la pantalla y producen una imagen nítida de lo que se encuentra al otro lado. En una cámara oscura los rayos de luz al pasar por la abertura

- a) son paralelos b) se cruzan entre sí
c) se difractan d) se polarizan

42. Las filtraciones de luz a través de aberturas en el follaje de los árboles se pueden simular modificando el arreglo casero utilizado para los eclipses. Para simular una cámara oscura, en lugar de la Luna se pone una hoja de papel con una pequeña abertura. Si se cubre la parte derecha del foco con otra hoja, en el círculo que simula la Tierra se verá que se oscurece la parte

- a) derecha b) izquierda
c) superior d) inferior

43. ¿Qué parte del ojo humano juega el papel de la abertura en una cámara oscura?

- a) La retina b) La córnea
- c) La pupila d) El iris

44. Para que se forme una imagen nítida en la pantalla de una cámara oscura se necesita que las dimensiones de la abertura sean del 1 % o menos de la distancia a la pantalla. En la rama de un árbol a 4 m de altura esto corresponde a aberturas menores de

- a) 40 mm b) 4 mm c) 1 cm d) 0.4 m

45. Suponer que en el Escarabajo de Oro de Edgar Allan Poe el escarabajo cayó 10 cm a un lado de donde debería haber caído. Suponer también que el punto donde cayó estaba a 50 cm del tronco del árbol. El tesoro del pirata estaría enterrado a 15 metros del tronco del árbol, en línea con el punto donde cayó el escarabajo. Calcular el tamaño angular de los 10 cm de error. Ese es también el tamaño angular del error a los 15 metros. Calcular el error en la proyección a 15 m. El error es de

- a) 1 m b) 2 m c) 3 m d) 4 m

46. La primera fotografía de la historia fue realizada por el físico francés José Nicéforo Niepce, utilizando una cámara oscura con una pantalla sensible a la luz donde pudo fijar la imagen del patio de su casa. Esto pasó a principios del siglo

- a) XVII b) XVIII c) XIX d) XX

47. En 1868 el astrónomo francés Pierre Janssen observó en un eclipse solar radiaciones electromagnéticas de color amarillo que resultaron corresponder a un elemento químico desconocido en la Tierra. Tiempo después se identificó su existencia en la Tierra y actualmente se utiliza en procesos industriales y para inflar los globos flotantes que adornan las fiestas de cumpleaños. Como fue descubierto en el Sol lo llamaron Helio, como el dios del Sol en la antigua Grecia. ¿Cuántos protones tiene el Helio?

- a) 1 b) 2 c) 3 d) 4

48. Aunque no se menciona comúnmente, Newton predijo en 1704 que la luz podría desviarse al pasar cerca de un cuerpo masivo como el Sol, como lo haría cualquier otro objeto atraído por la gravedad del Sol. De hecho, la desviación es independiente de la masa del objeto por lo que bien se podría aplicar a las partículas de luz. En 1784 Cavendish calculó esta desviación. Más de un siglo después Einstein en su Teoría General de la Relatividad predijo que la desviación debería ser del doble de la que calculó Cavendish. ¿Cuál de las dos teorías de la gravitación sería la correcta? Para decidirlo, Eddington viajó a África para realizar mediciones durante un eclipse solar y mostró que la teoría de Einstein era la correcta. La medición se realizó después de la primera guerra mundial. Era el año

a) 1917 b) 1918 c) 1919 d) 1920

49. El planeta Venus tiene un diámetro de 12,140 km, casi igual al de la Tierra, y durante su tránsito por el Sol se encuentra a 42 millones de km de nosotros. Con estos datos se puede calcular su tamaño angular el cual resulta ser de 0.016 grados. Las fotografías de su tránsito por el Sol semejan una pasa sobre un pastel. Su tamaño angular es equivalente a ver a 10 km un objeto con un diámetro de

a) 1 m b) 2 m c) 3 m d) 4 m

50. Por mucho tiempo se pensó que la luz se transmite instantáneamente de un lugar a otro. La primera medición de su velocidad la realizó Roemer en 1,676 con observaciones de los eclipses del satélite Ío de Júpiter. El momento del eclipse se adelantaba cuando la Tierra estaba más cerca de Júpiter, y se atrasaba cuando estaba más lejos de Júpiter. Roemer llegó a la conclusión de que la explicación era que la luz no se transmite instantáneamente. Sus mediciones se resumen en un retraso de 22 minutos a lo largo del diámetro de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Supongan que este diámetro es de 300 millones de km. La velocidad que calculó fue de

a) 227,000 km/s b) 257,000 km/s
c) 287,000 km/s d) 300,000 km/s

Agradecimientos

La logística del evento estuvo a cargo de Mario González Escobar, Humberto S. Benítez Pérez, Enid Araceli Morán Valdés, Ángel Daniel Peralta Castro, Sergio Manuel Arregui Ojeda. En las mesas de divulgación y en los laboratorios colaboraron Luis Delgado Argote, Mario González Escobar, Efraín Gómez Arias, Javier Alejandro González Ortega, Claudio Inguaggiato, Oscar Alberto Castro Artola, Carlos Simón Reyes Martínez, Luis Eduardo Calderón Aguilera, Omar Valencia Méndez, María del Carmen Rodríguez Medrano así como Gabriel Rendón Marquez, Luis Gradilla Martínez, Martín Francisco Pacheco Romero, Fernando Herrera Barrientos, Cristian Alejandro Gallegos Castillo, María Alejandra Nuñez Leal, Luis Alejandro Yegres Herrera, Rogelio Arce Villa, María Margarita Martínez Rodríguez, Agustín Mastache Román, Luis Eduardo Ochoa Tinajero, Elvia Ramón Morales, Andrés Navarro Rodríguez, Esmeralda Morales Domínguez, Claudia Rebeca Navarrete Torices, Cynthia Alejandra González Cajero con el apoyo de los estudiantes de posgrado de diversos programas: Blanca Suhey Apolinar Morales, Iris Lucía Gauna Saucedo, Arceo Ernesto Lázaro Larios, Aliuska Peña Reyna, Sabrina Pappaterra, Iván Barea Pérez, Eduardo Rodríguez Orozco, Ignacio Francisco García Meza, Nina Adhara Elena Ávila Ortiz. En la coordinación de recorridos, Ana Karina Espinoza Villalva, con la participación de los estudiantes del Programa de Posgrado de Ciencias de la Tierra: Ariadna del Carmen Lucho González, Eduardo Monreal Roque, Julia Isabel Ventura Marroquín, Marisol Juárez Reyes, Alejandra Ixchel Sánchez Martínez, Young Ho Aladro Chio, Maribel Reyes Tixteco y Cristal Méndez Díaz. En la coordinación de los recorridos para los maestros participaron Laura Verónica Vélez Andrade y Thalia Anaid Aviles Esquivel.

Manuscrito recibido: 2 de julio de 2024

Manuscrito aceptado: 10 de julio de 2024

Análisis de la actividad sísmica en el noroeste de México durante el periodo de julio 2023 a julio 2024.

María Alejandra Núñez Leal*, Oscar Alberto Castro Artola, Luis Alejandro Yegres Herrera, Carlos Eduardo Reinoza Gómez, Francisco Javier Farfán Sánchez, Rogelio Arce Villa, Sergio Manuel Arregui Ojeda, Rogelio Ojeda Arechiga.

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología.

Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México

*E-mail: anunez@cicese.mx

Resumen

La Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), operada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), realiza un monitoreo continuo de la actividad sísmica en el noroeste de México. Durante el periodo comprendido entre julio de 2023 y julio de 2024, la RESNOM registró un total de 4,100 eventos sísmicos, con magnitudes que variaron entre ML 0.4 y MW 5.6. Esta actividad sísmica se concentró principalmente en tres regiones: el Valle de la Trinidad, el Valle de Mexicali y frente a las costas cercanas a Loreto, Baja California Sur, en el Golfo de California. Entre los sismos registrados, se identificaron cinco eventos con magnitudes mayores o iguales a 5 ($M \geq 5$). De éstos, cuatro ocurrieron en el Golfo de California y uno en el Valle de Mexicali, cerca del poblado Delta. La actividad sísmica restante se distribuyó de la siguiente manera: 98 sismos con magnitudes entre 4 y 5 ($4 \leq M < 5$), 510 eventos con magnitudes entre 3 y 4 ($3 \leq M < 4$), 1,030 eventos con magnitudes entre 2 y 3 ($2 \leq M < 3$), 2,107 eventos con magnitudes entre 1 y 2 ($1 \leq M < 2$) y 218 sismos con magnitudes menores a 1 ($M < 1$).

En este trabajo se presenta un análisis temporal y espacial de la liberación de energía asociada a estas secuencias sísmicas, asumiendo una equivalencia entre ML y MW. Se destacan patrones de actividad sísmica y clusters principales, los cuales están directamente vinculados a sistemas de fallas tectónicas activas en la región.

Introducción

La RESNOM ha operado durante más de cuatro décadas y forma parte importante de la infraestructura del Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). Esta red detecta y registra en forma continua la actividad sísmica que ocurre en los estados de Baja California, Sonora, Baja California Sur y Sinaloa. Esta región está caracterizada por un alto nivel de actividad tectónica debido a la interacción entre las placas Pacífico y Norteamérica. Esta frontera tectónica incluye al Sistema de Fallas San Andrés y a los sistemas asociados al proceso de apertura del Golfo de California.

Para llevar a cabo este monitoreo, la RESNOM procesa las señales de 116 estaciones (Figura 1) de las siguientes subredes: Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) (CICESE, 2024), Red Sismológica de Banda Ancha del Golfo de California (RESBAN) (Castro et al., 2018), Redes Acelerométricas Urbanas de Baja California (RAUBC), RANOM (Red Acelerométrica del Noroeste de México) y la Red Sismológica de La Paz (RSLP). A través de convenios de colaboración interinstitucionales, también se integran datos de la Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional (SSN-UNAM, 1998) y de la Red Sísmica del Sur de California (SCSN; Caltech, 2013). Estas estaciones contribuyen al procesamiento inicial automatizado que genera localización, magnitud y un mapa preliminar

de intensidades. Posteriormente, los analistas realizan un refinamiento manual que incluye la determinación de parámetros avanzados, como el mecanismo focal y el tensor de momento sísmico (TMS) para eventos sísmicos significativos (Vidal-Villegas et al., 2018).

Distribución de la Sismicidad y patrones de liberación de energía

Durante el periodo de estudio, se localizaron 4,100 sismos con magnitudes entre ML 0.4 y MW 5.6. El análisis temporal de la actividad sísmica muestra que los periodos de mayor liberación de energía coincidieron con la ocurrencia de clusters, destacando la influencia de procesos tectónicos locales y regionales en las siguientes tres áreas:

1. Valle de la Trinidad

Se registraron 654 sismos de magnitudes $1.0 \leq M \leq 4.2$. El 27 y 28 de mayo de 2024, se registraron dos sismos M 4.2, (Grupo de trabajo RESNOM, 2024a). En la figura 2A se muestran los dos principales clusteres (C1 y C2) identificados en esta secuencia. El primero de ellos guarda relación con un aumento de sismicidad en julio de 2023, luego de la ocurrencia de un sismo de M 3.9. Por espacio de meses, la actividad permanece constante, hasta finales de mayo de 2024, donde se presentan los sismos de M 4.2 y se reporta un incremento importante en la sismicidad que ha sido agrupada en el clúster C2. El mecanismo focal revela una fuerte componente normal para el evento del 27 de mayo de 2024. Si bien, la falla de San Miguel es reconocida como una estructura transcurrente lateral derecha; el fallamiento cruzado, la presencia de pequeñas cuencas de tracción y, por ende, el fallamiento normal juegan un rol importante en la sismicidad de esta zona (Doser et al. 1992, Martínez et al. 2023a).

Se observa constante actividad sísmica en esta región durante todo el año de análisis (Figura

2B); pero que, además, es continuación de un incremento de la sismicidad desde el 17 de agosto de 2021, con la ocurrencia de un sismo de ML 5.1 en el Valle de Trinidad, específicamente en la intersección de la Falla San Miguel con una “fractura” orientada ortogonalmente (Martínez González, 2023b).

2. Secuencia del Valle de Mexicali

El 12 de mayo de 2024, comenzó una secuencia sísmica en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, cercano al poblado Estación Delta, en el valle de Mexicali, Baja California (Figura 3A). Esta actividad se concentró en el extremo noroeste de la falla Cerro Prieto y en la región comprendida entre las fallas Morelia y Nuevo León, dentro de una cuenca tipo pull-apart (Suárez-Vidal et al., 2010).

El sismo de mayor magnitud (M 5.0) ocurrió el 12 de mayo de 2024, el mecanismo focal de este evento revela fallamiento normal con componente de deslizamiento lateral, consistente con el régimen tectónico transtensional característico de la región (Grupo de trabajo RESNOM, 2024b). Durante el periodo analizado, se registraron en total 242 sismos con magnitudes comprendidas entre 1 y 5. Si bien, la actividad sísmica tuvo un comportamiento relevante a lo largo del año, como se puede observar en la Figura 3B, destacan dos clusters principales: el primero en agosto de 2023 (C3) y el segundo en mayo de 2024 (C4).

3. Secuencia del Golfo de California, costas de Loreto, BCS

En enero de 2024 se inició una serie de eventos sísmicos en la Cuenca Carmen, ubicada en el Golfo de California, aproximadamente a 70 km al noreste de la ciudad de Loreto, Baja California Sur (Figura 4A). La actividad sísmica se concentró entre las fallas transformantes Carmen y Farallón, delimitando los márgenes de la cuenca Carmen de tipo pull-apart (Bennett et al., 2013).

Durante el periodo analizado se registraron 509 eventos sísmicos con magnitudes entre M 1.0 y M 5.6. El evento de mayor magnitud (M 5.6) ocurrió el 18 de abril de 2024, acompañado por intensa actividad sísmica: 55 sismos se localizaron ese mismo día y, entre enero y abril de 2024, se contabilizaron 80 eventos con magnitud $M \geq 4$ (Figura 4B).

Los mecanismos focales obtenidos mediante la inversión del tensor de momento para los eventos más significativos revelan fallamiento normal y transformante, consistente con la tectónica activa de la región (Grupo de trabajo RESNOM, 2024c).

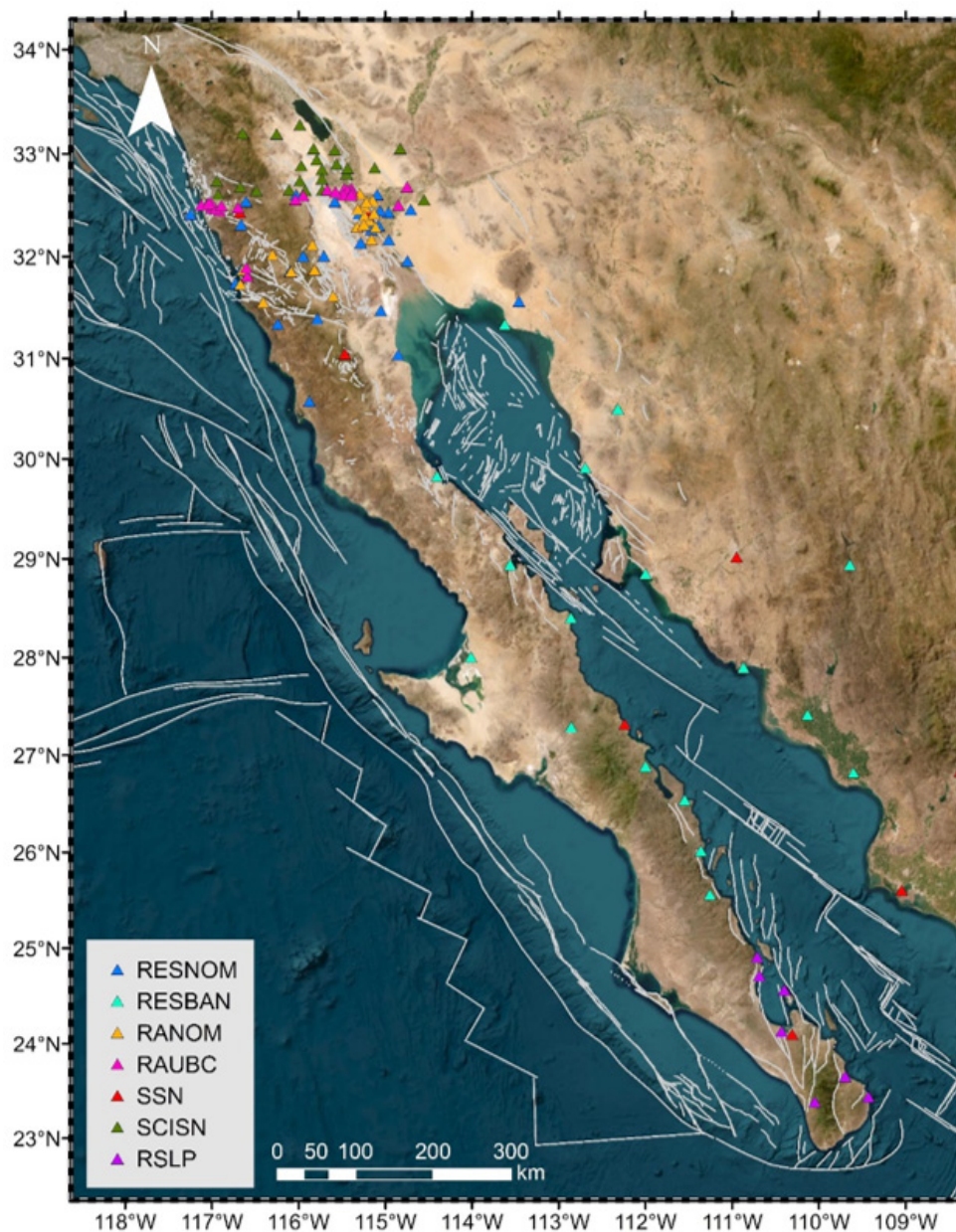


Figura 1. Estaciones de la Red Sísmica del CICESE, Servicio Sismológico Nacional (SSN) y Red del Sur de California (SCISN), utilizadas por la RESNOM, para localizaciones epicentrales y cálculo de magnitudes.

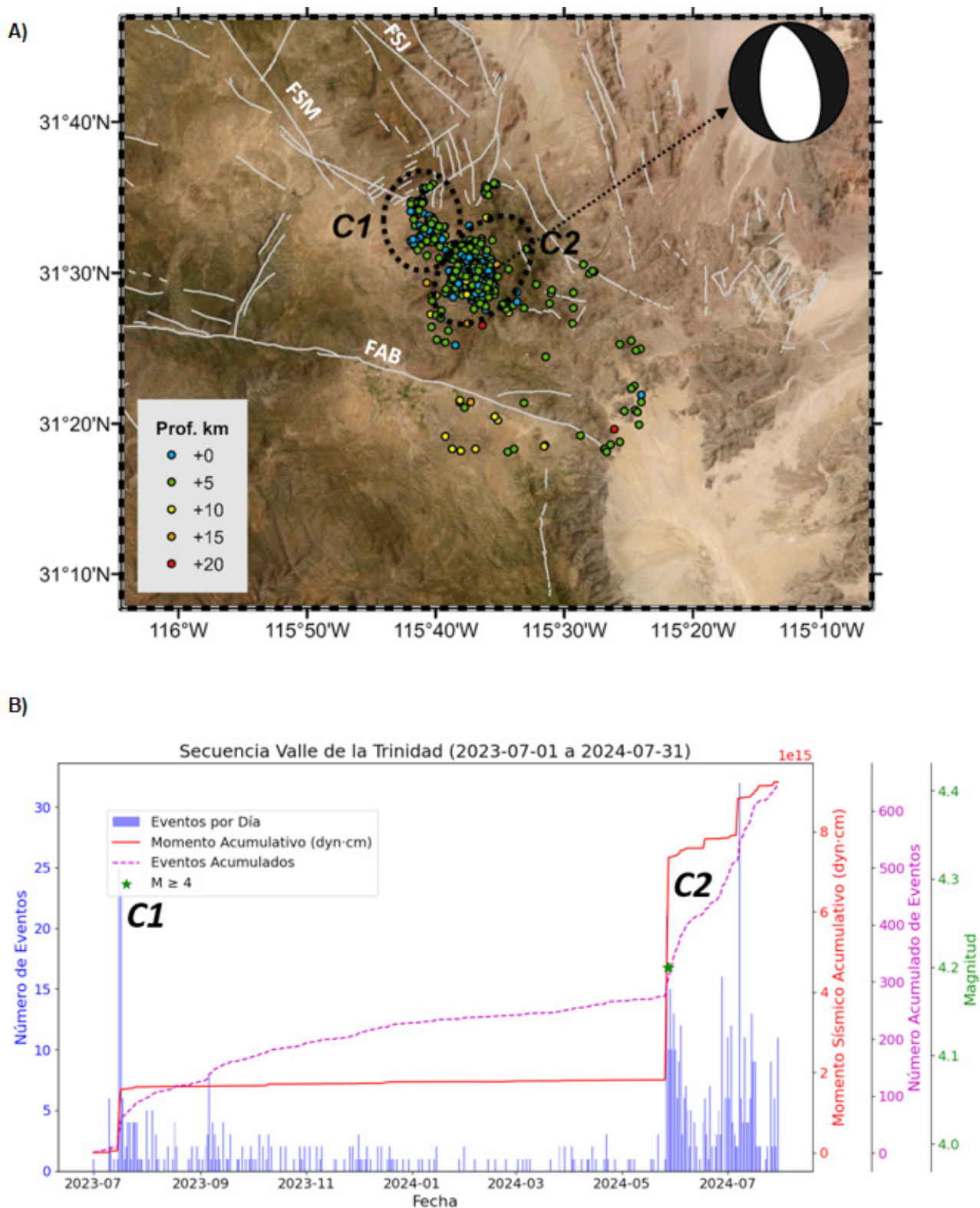


Figura 2. (A) Mapa que muestra la actividad sísmica registrada en el Valle de la Trinidad durante el periodo de julio de 2023 a julio de 2024, indicando la distribución espacial de los eventos sísmicos. (B) Gráfica del número de sismos registrados, el momento sísmico liberado y el número acumulativo de eventos en el periodo analizado. FSI=Falla Sierra Juárez, FSM=Falla San Miguel, FAB=Falla Agua Blanca.

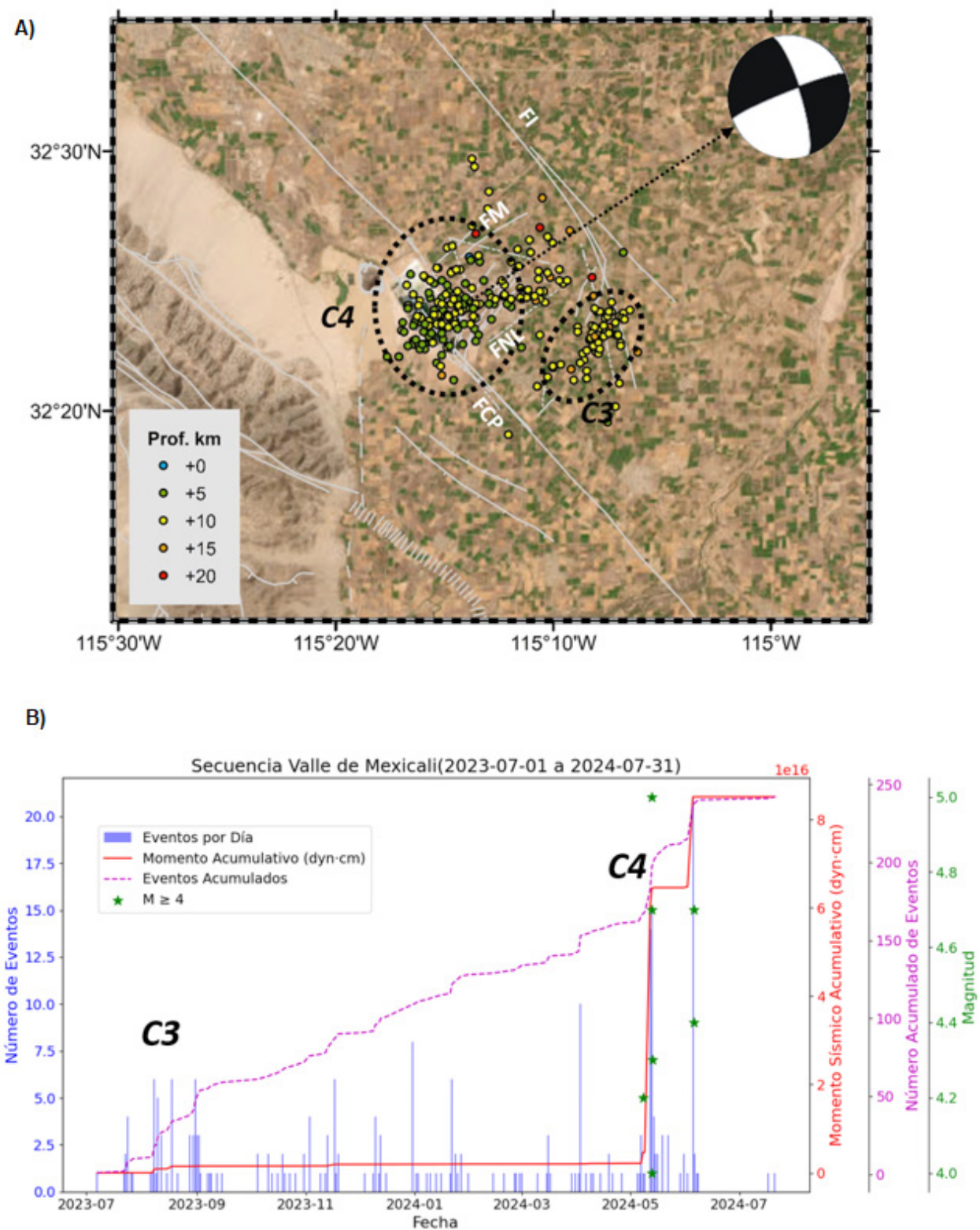


Figura 3. (A) Mapa de la actividad sísmica registrada en el Valle de Mexicali durante el periodo de julio de 2023 a julio de 2024, indicando la distribución espacial de los eventos sísmicos. (B) Gráfica del número de sismos registrados, el momento sísmico liberado y el número acumulado de eventos en el periodo analizado. FI=Falla Imperial, FM=Falla Morelia, FNL=Falla Nuevo León, FCP=Falla Cerro Prieto.

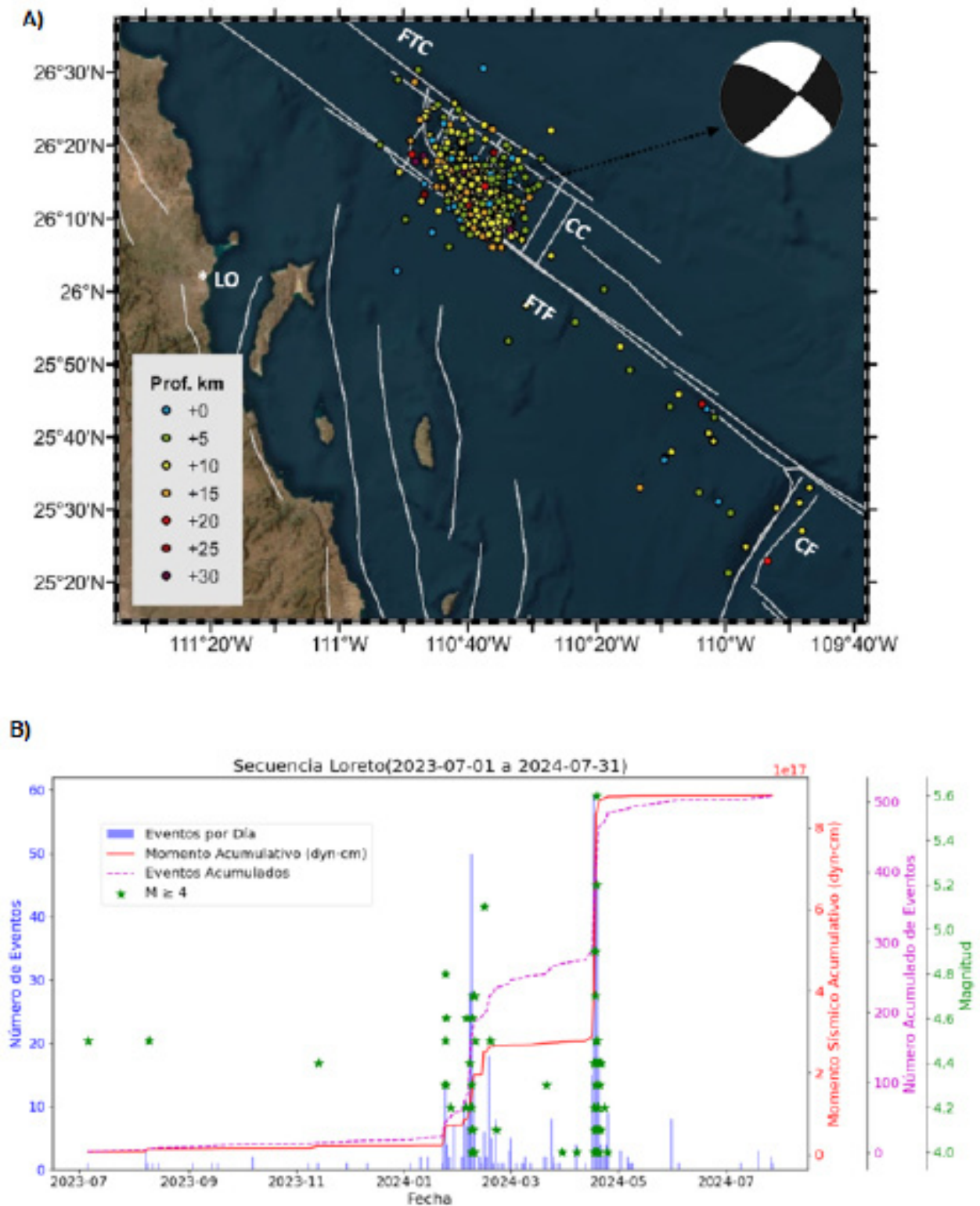


Figura 4. (A) Mapa de la actividad sísmica registrada en el Golfo de California, frente a las costas de Loreto BCS, durante el periodo de julio de 2023 a julio de 2024. (B) Representación gráfica del número de sismos registrados, el momento sísmico liberado y el número acumulativo de eventos en el periodo analizado. FTC=Falla Transformante Carmen, CC=Cuenca Carmen, FTF=Falla Transformante Farallón, CF=Cuenca Farallón, LO=Loreto.

Conclusiones

El periodo de julio de 2023 a julio de 2024 estuvo marcado por una actividad sísmica significativa en el noroeste de México, particularmente en el Valle de la Trinidad, Valle de Mexicali, Golfo de California frente a Loreto. Este estudio subraya la necesidad de continuar con el monitoreo detallado de estas áreas y de implementar estrategias que reduzcan los riesgos asociados a eventos sísmicos.

El análisis temporal de la actividad sísmica muestra que los periodos de mayor liberación de energía coincidieron con la ocurrencia de clusters, destacando la influencia de procesos tectónicos locales y regionales. Por ejemplo, los eventos en el Valle de Mexicali están asociados al Sistema de Fallas Cerro Prieto, mientras que la actividad en Loreto parece estar vinculada a procesos de extensión en el Golfo de California. El Valle de la Trinidad por su parte, está asociado a la zona de confluencia de cuatro sistemas de fallas principales de las Sierras Peninsulares de Baja California: Agua Blanca, San Miguel, Sierra Juárez y San Pedro Mártir.

Agradecimientos

Al CONAHCYT y al CICESE por el soporte económico para la operación y mantenimiento de la RSC, bajo el proyecto C0F117 “Redes Sismológicas del CICESE”. Al personal administrativo y de apoyo del CICESE. Al personal técnico y coordinadores de las subredes de la RSC: RESBAN RANOM, RAUBC, REGNOM y RSLP. A los directores y personal técnico del Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) y la Red Sísmica del Sur de California (SCSN) en los EE.UU., por su disposición y apoyo para el intercambio de datos en tiempo real. A Luis Delgado Argote y el equipo editorial de GEOS.

Referencias

- Bennett, S. & Oskin, M. & Iriondo, A. (2013). Transtensional rifting in the proto-Gulf of California near Bahía Kino, Sonora, México. *Geological Society of America Bulletin*, 125. 1752-1782. 10.1130/B30676.1.
- Caltech (2013). Southern California Earthquake Center. <https://doi.org/10.7909/C3WD3xH1>
- Castro, R. R., Mendoza-Camberos, A. and Pérez-Vertti, A. (2018). The Broad Band Seismological Network (RESBAN) of the Gulf of California, México. *Seismological Research Letters*, Vol. 89, No. 2A, pp. 338-344. <https://doi.org/10.1785/0220170117>
- CICESE. (2024). Red Sísmica del Noroeste de México. <https://doi.org/10.7914/SN/BC>
- Doser, D. I. (1992). Faulting processes of the 1956 San Miguel, Baja California, earthquake sequence. *Pure and Applied Geophysics*, 139(1), 3–16. <https://doi.org/10.1007/BF00876824>.
- Grupo de trabajo RESNOM (2024a) Reporte del sismo del 27 de mayo de 2024 M4.2 https://resnom.cicese.mx/sitio/ui/img/Boletines/reportes_20240527_M4.2_v.1.1.pdf
- Grupo de trabajo RESNOM (2024b) Reporte preliminar del sismo del 12 de mayo de 2024 M5. https://resnom.cicese.mx/sitio/ui/img/Boletines/reportes_20240512_M5.0_v.2.0.pdf
- Grupo de trabajo RESNOM (2024c) Reporte de la secuencia sísmica del 23 de enero al 18 de abril de 2024. <https://resnom.cicese.mx/sitio/ui/img/Boletines/Golfo18abril.pdf>
- Martínez González, A. I., Reinoza Gómez, C. E., Vidal Villegas, J. A., & Audemard M., F. A. (2023a). Evidencias de fallamiento ortogonal como responsable de la secuencia sísmica de Valle de la Trinidad, Baja California, 2020-2022. Reunión anual UGM 2023, 1–2.

Martínez González, A.I. (2023b). Relocalización hipocentral por doble-diferencia y cálculo del momento sísmico para la secuencia sísmica de Valle de la Trinidad, Baja California, para el período 2020-2022. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 91 pp.

Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., Nafarrete-Zamarripa, L., Ramírez-Hernández, J., & Glowacka, E. (2010). Shape and dimensions of the Cerro Prieto pull-apart basin, Mexicali, Baja California, Mexico, based on the regional seismic record and surface structures. *International Geology Review*, 50(7), 636-649. doi: 10.2747/0020-6814.50.7.636.

UNAM (1998). Servicio Sismológico Nacional. UNAM. URL <http://www.ssn.unam.mx/> (accedida el 5.17.21).

Vidal Villegas, J. A., Munguía Orozco, L., González Ortega, J. A., Nuñez Leal, M. A., Ramírez Ramos, E. E., Mendoza Garcilazo, L. H., Castro Escamilla, R. R., and Wong Ortega, V. M. (2018). The Northwest Mexico Seismic Network: real time seismic monitoring in northern Baja California and northwestern Sonora, Mexico. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 324–337 <https://doi.org/10.1785/0220170183>

Diagnóstico energético para el Liceo Técnico Profesional El Sauce de Talca

Franco Gallardo¹, Hugo Valdés^{2*}

¹Programa de Magíster en Construcción Sustentable, Departamento de Obras Civiles, Universidad Católica del Maule, Avenida San Miguel 3605, Talca (Chile)

²Centro de Innovación en Ingeniería Aplicada, Departamento de Computación e Industrias, Universidad Católica del Maule, Avenida San Miguel 3605, Talca (Chile).

*hvaldes@ucm.cl

Resumen

El objetivo de esta investigación es realizar un estudio exhaustivo sobre el confort térmico y el consumo energético del Liceo Técnico Profesional El Sauce de Talca. A través de un análisis detallado, se evalúan los patrones de consumo de energía en el Liceo, identificando áreas de eficiencia y posibles oportunidades de mejora. Se utilizan herramientas y metodologías específicas para recopilar datos precisos sobre el uso de electricidad, agua y otros recursos energéticos. Los resultados obtenidos permiten proponer recomendaciones y estrategias para optimizar el consumo energético, reducir costos y promover prácticas sostenibles dentro del establecimiento educativo. Este diagnóstico energético ofrece una base sólida para la implementación de medidas de eficiencia energética que beneficien tanto al Liceo como al ambiente.

Palabras clave: Confort térmico, Método de Fanger, Chile, Satisfacción térmica.

Abstract

The aim of this research is to conduct a comprehensive study on the thermal comfort and energy consumption of Liceo El Sauce de Talca. Through a detailed analysis, the energy consumption patterns at the school are evaluated, identifying areas of efficiency and potential opportunities for improvement. Specific tools and methodologies are used to gather precise data on the use of electricity, water, and other energy resources. The results obtained allow for the proposal of recommendations and strategies to optimize energy consumption, reduce costs, and promote sustainable practices within the educational establishment. This energy diagnosis provides a solid foundation for the implementation of energy efficiency measures that benefit both the school and the environment.

Key words: Thermal comfort, Fanger's Method, Chile, Thermal satisfaction.

Introducción

El sistema educativo en su conjunto debe estar constantemente actualizando contenidos, normativa o marcos regulatorios que vayan en mejora del estándar educacional. Hoy, lo que se requiere en los programas vigentes es mejorar la infraestructura mediante remodelación de los espacios educativos de acuerdo a la superficie por alumno (m^2 /alumno), sumando nuevos espacios educativos de acuerdo a un nivel de construcción acorde a certificación CES (Construcción de Edificaciones Sustentables), para contribuir a

la integración y aplicación del alumnado en diferentes ámbitos (investigación, proyectos de innovación, talleres prácticos, acercamiento a la universidad, entre otros) (Salazar-Vera, 2022; Alhilli y Burhan, 2021; Peterssen-Soffia, 2020). Estos factores, están directamente orientados a mejorar las condiciones de habitabilidad (confort), ya que una significativa inversión en esta materia irá en vías del desarrollo cultural, tecnológico y motivacional para los mismos alumnos (Lamberti *et al.*, 2021; Rodríguez *et al.*, 2021; Zomorodian *et al.*, 2016).

El confort térmico, acústico y lumínico, son variables que resumen bien el confort ambiental. Si alguno de los factores que influyen en el confort del usuario se eleva por sobre ciertos límites, a largo plazo se produce un estrés negativo en el cuerpo que puede desencadenar diversas enfermedades físicas y psicológicas asociadas (De Dear *et al.*, 2020; Paul y Taylor, 2008). El impacto del diseño del aula en el aprendizaje de los alumnos es determinante, ya que puede afectar directamente en el rendimiento, como también en el aspecto emocional y salud del estudiante (Barrett *et al.*, 2015). El confort térmico se logra a través del mantenimiento de la temperatura, la humedad y el movimiento del aire y las condiciones de la actividad humana en un determinado rango (Adrián *et al.*, 2016). En Chile, en el marco de un seminario internacional realizado por la Universidad del Bío-Bío con la finalidad de crear criterios en materia de sustentabilidad, Trebilcock (2020) señaló que “Los colegios en nuestro país tienen un estándar de confort térmico que es bastante bajo, con temperaturas interiores en las aulas que van de los 8 °C a los 13 °C (meses de invierno) en horario de ocupación” y enfatizó que en los mismos colegios durante los meses de verano se registran temperaturas entre 18 °C y 32 °C. Además, presentó que el confort térmico se relaciona positivamente con la asistencia del alumno a clases.

Además del confort referido, los establecimientos educacionales se enfocan cada vez más en la productividad tecnológica, con el fin de complementar procesos educativos, utilizando recursos audiovisuales como pizarras interactivas, proyectores de imagen, equipos de laboratorio, entre otros, los cuales permiten la absorción de conocimiento de manera más interactiva. Para el funcionamiento de esta tecnología se requiere conexión a la red eléctrica, el problema radica cuando la red de los establecimientos es antigua o no contempla en su diseño artefactos de primera generación.

El objetivo de este trabajo es diagnosticar energéticamente un Liceo rural, estableciendo una línea base energética y, a partir de ello, proponer soluciones tecnológicas en beneficio de la comunidad escolar.

Metodología

Recopilación de información que define el caso estudio: En el Liceo Técnico Profesional El Sauce (LTP-ES) (ver Figura 1a) se educa a 378 estudiantes (pre-kínder a cuarto medio) de Talca y San Clemente, principalmente del sector rural Mercedes. En esta Institución educativa, los estudiantes se gradúan con el título de Técnico en Gastronomía. El LTP-ES cuenta con 65 profesionales (docentes y paradocentes), está ubicado entre Talca y San Clemente (km 10, Ruta Ch-115). El edificio se construyó en 2003. La Figura 1b muestra un esquema de distribución de los diversos recintos que conforman el LTP-ES, donde se observa una superficie construida de 2337 m², siendo la planta 1 (primer piso) de 1989 m² y la planta 2 (segundo piso) de 348 m². Cuenta con doce salas de clases, una sala de computación, biblioteca, aula de integración, comedor y multicancha.

La Figura 2 muestra que la materialidad de algunos edificios, cuya infraestructura de ambas plantas es albañilería armada, está reforzada con pilares y cadenas de hormigón armado, tiene revestimiento de piso cerámica, terminación de muros de ladrillo estucado con mortero tanto en cara interior como exterior. Sin otra aislación, el revestimiento de cielo tiene un acabado de yeso-cartón en las zonas donde solo el edificio es de una planta y una terminación de yeso en la parte inferior donde se encuentra la losa de la planta dos. Las ventanas son de vidrio simple con marco de aluminio. La estructura de techumbre está conformada principalmente por madera y el revestimiento exterior del techo es teja de arcilla. El LTP-ES presenta un estándar de menor calidad de construcción de acuerdo a los requisitos que hoy el país, por medio del MINVU, está determinando mediante la Certificación de Edificaciones Sustentables (CES).

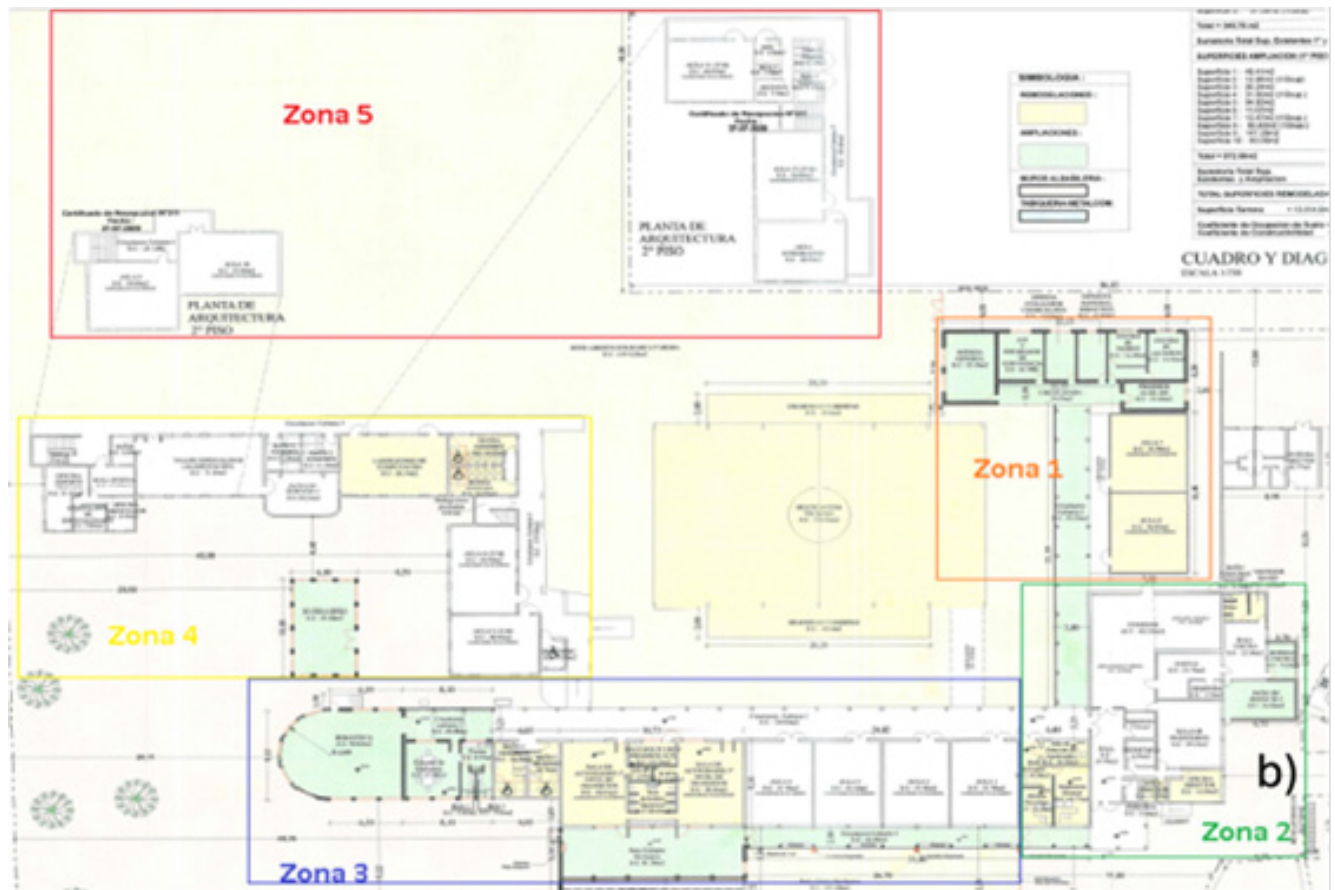


Figura 1. a) Imagen satelital de la ubicación del Liceo El Sauce. El borde rojo indica la delimitación del terreno. b) Esquema del LTP-ES, destacando las zonas estudiadas.



Figura 2. Fotografías del exterior del LTP-ES. a) Vista sur del LTP-ES, sector salas de clases b) Vista este del LTP-ES, sector salas de clases.

Tabla 1. Valores promedios mensuales de temperaturas y precipitación de la zona de Talca.

Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura promedio (°C)	Precipitación (mm)
Ene	29 ± 3	12 ± 2	21 ± 3	7 ± 3
Feb	28 ± 2	11 ± 3	20 ± 3	12 ± 2
Mar	25 ± 3	9 ± 3	17 ± 3	24 ± 7
Abr	20 ± 3	6 ± 2	13 ± 3	63 ± 20
May	17 ± 3	5 ± 3	11 ± 3	111 ± 30
Jun	13 ± 2	4 ± 3	9 ± 3	121 ± 30
Jul	13 ± 2	3 ± 3	8 ± 3	90 ± 40
Ago	15 ± 2	4 ± 2	9 ± 2	70 ± 20
Sep	17 ± 2	5 ± 3	11 ± 2	49 ± 20
Oct	20 ± 2	7 ± 2	14 ± 2	26 ± 15
Nov	24 ± 3	8 ± 2	16 ± 2	15 ± 5
Dic	27 ± 2	11 ± 2	19 ± 2	7 ± 3

La Tabla 1 muestra las variables climáticas de la zona geográfica de la ubicación del LTP-ES, dando cuenta de un clima templado y cálido. Los inviernos son más lluviosos que los veranos.

El clima se clasifica como Csb por el sistema Köppen-Geiger, es decir, clima mediterráneo con veranos secos y frescos (Beck *et al.*, 2018).

El Diagnóstico Energético (DE) permite establecer los parámetros adecuados de uso y demanda de energía del establecimiento para analizar su materialidad y hábitos de la población del LTP-ES, en función del consumo energético (térmico y eléctrico) (González-Galvez *et al.*, 2018). En este caso se aplica un DE fundamental, es decir, el DE proporciona información sobre el consumo de energía, ya sea eléctrica o térmica, en áreas funcionales o en procesos de operación específicos. Este nivel de análisis es el más útil para determinar el ahorro potencial en una instalación debido a su análisis cualitativo y cuantitativo sobre la mayoría de los equipos que consumen energía. Este nivel ofrece datos sobre el ahorro de energía y la reducción de costos, estableciendo así objetivos para lograr una mayor eficiencia energética. Para este nivel de DE es importante disponer del equipo e instrumentos necesarios para la evaluación de los parámetros energéticos (González-Galvez *et al.*, 2018).

Dado lo anterior, se comenzó realizando una evaluación del ambiente de la sala de clases, donde se midieron las propiedades del aire que

influyen con el equilibrio térmico del cuerpo: temperatura, velocidad y humedad, según el Método Fanger (Holopainen *et al.*, 2014). Este método permite cuantificar la insatisfacción térmica de la población escolar al interior de la sala de clases (Martínez-Molina *et al.*, 2017; Campano *et al.*, 2017; Ter Mors *et al.*, 2011). El porcentaje promedio de insatisfechos térmicos (PPD, por su nombre en inglés) se determina mediante la ecuación siguiente (Broday *et al.*, 2020):

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0.03353 \cdot IVM^4 - 0.2179 \cdot IVM^2)} \quad (1)$$

donde, *IVM* es el índice de valoración media estimado que refleja el valor medio de votos emitidos por un grupo de personas respecto a una escala de sensación térmica -3 al +3 (Figura 3), válido para ambientes térmicos en los que las variables implicadas permanezcan comprendidas dentro de los rangos mostrados en la Tabla 2. Este *IVM* depende de factores como actividad, vestimenta, temperatura operativa y velocidad relativa del aire.

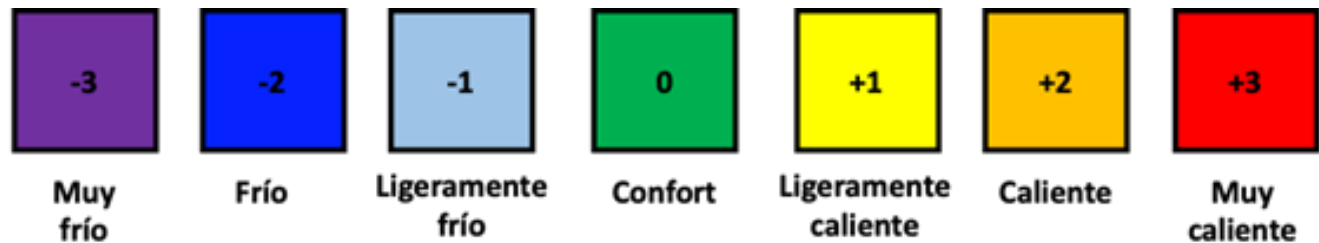


Figura 3. Esquema de la escala de sensación térmica.

Tabla 2. Rangos de parámetros para determinar *IVM* y *PPD* mediante el Método Fanger (basado en UNE-EN ISO 7730:2006).

Parámetro	Tolerancia	Unidades
Tasa metabólica	46 - 232 0.8 - 4.0	W/m ² Met
Aislamiento de la ropa	0.00 - 0.31 0 - 2	m ² K/W clo
Temperatura del aire	10 - 30	°C
Temperatura radiante media	10 - 40	°C
Velocidad del aire	0 - 1	m/s
Presión del vapor de agua	0 - 2700	Pa

El IVM se estima a partir de tablas en UNE-EN ISO 7730 (2006), las cuales están calculadas bajo la condición de humedad relativa del aire del 50%, por lo cual, se debe realizar la corrección de esta a través de la ecuación:

$$IVM_{final} = IVM + F_H \cdot (HR - 50) + F_R \cdot (TRM - t_a) \quad (2)$$

donde, IVM es el índice de valoración media, F_H es el factor de corrección del IVM en función de la humedad relativa (ver Figura 4), HR es la medida (%) de la humedad relativa promedio del aire,

F_R es el factor de corrección del IVM en función de la temperatura radiante media (ver Figura 5), t_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y TRM es la temperatura radiante media ($^{\circ}\text{C}$) que se obtiene por la ecuación siguiente:

$$TRM = TG + 1.9 \cdot \sqrt{v} \cdot (TG - TS) \quad (3)$$

donde, TG es la temperatura de globo ($^{\circ}\text{C}$), TS es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y v es la velocidad relativa del aire (m/s).

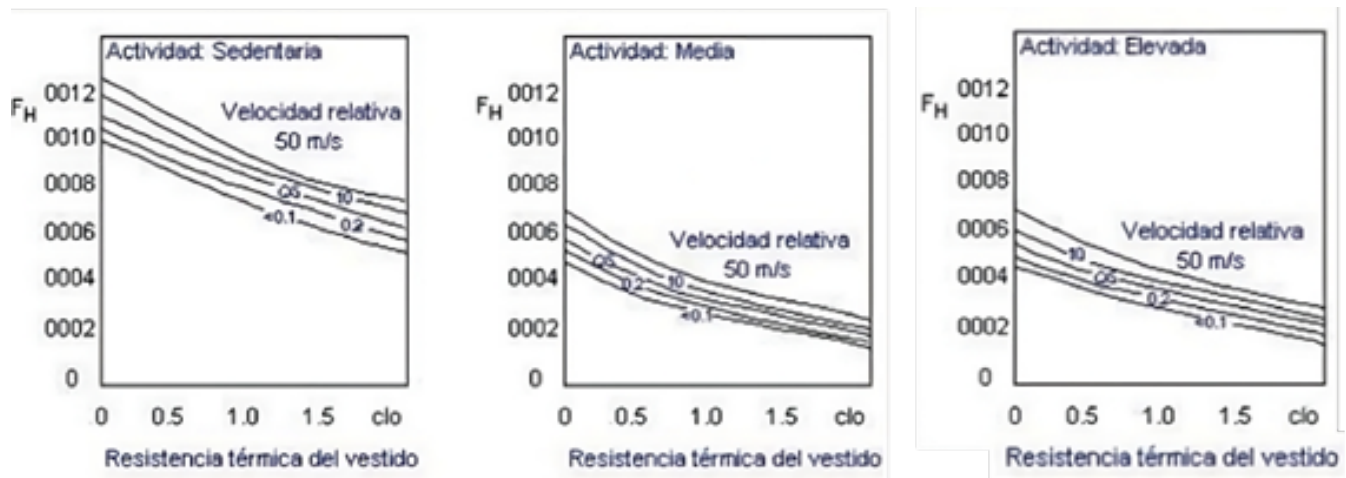


Figura 4. Factor de corrección para la humedad en la ecuación de IVM en función del nivel de actividad: a) sedentaria, b) media, c) elevada (Castejón, 1983).

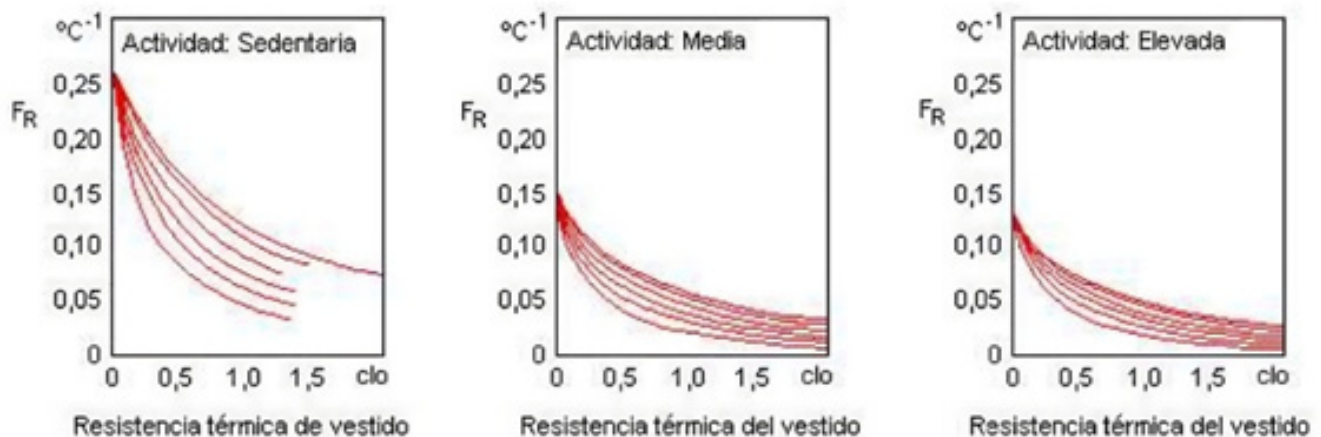


Figura 5. Factor de corrección para la temperatura radiante media en la ecuación de PMV en función del nivel de actividad: a) sedentaria, b) media, c) elevada (Castejón, 1983).

Para este estudio se eligió una sala de clases como caso de estudio tipo (Figura 6), determinada de manera unánime por el cuerpo docente de acuerdo con condiciones desfavorables (temperatura principalmente) de ambiente y en función al comportamiento de los estudiantes, el cual permitiese realizar las mediciones sin interferencias. El curso que ocupa la sala de clases tuvo una asistencia máxima de 23 estudiantes.



Figura 6. Sala de clase utilizada para la realización de las mediciones mediante el equipo de estrés térmico (Castejón, 1983).

Las mediciones se realizaron durante el periodo de invierno entre 21 de junio y 21 de septiembre, en dos ocasiones por día de la semana y se efectuaron entre 08:45 y 13:30 h. Se utilizó un medidor de estrés térmico (Lutron, modelo WBGT-2010SD) para tener el registro de la temperatura del aire, humedad relativa del aire y temperatura de globo. Además, la velocidad del aire se midió con un anemómetro portátil (LA CROSSE® Technology, Modelo EA-3010U). El resultado permitirá lograr una visión más amplia de la satisfacción térmica que puede haber en una sala de clases de este establecimiento. A pesar de que el levantamiento fue realizado durante el invierno, siempre se contó con más de un 90% de la asistencia de alumnos. La edad de los jóvenes oscila entre 12 y 13 años.

Por otro lado, el diagnóstico energético implica etapas de autorización necesaria para trabajar, revisión de facturación del uso de energía y recopilación de datos, enfocándose en el conocimiento de la demanda energética en edificios (González-Galvez *et al.*, 2018). Por lo tanto, los pasos realizados fueron:

- Solicitar el permiso a autoridades responsables del LTP-ES, para recopilar la información competente.
- Análisis de la facturación eléctrica de 24 meses (enero 2018 a diciembre 2019).
- Conocer el tipo de actividad en cada área de establecimiento, para orientar la obtención de datos de los artefactos eléctricos (potencia instalada principalmente) de: cargas de iluminación, climatización y artefactos eléctricos, detallando las cantidades por cada recinto perteneciente al Liceo. Además, se estableció durante qué periodo se usa en el día y cuántos días de uso al mes (demanda de consumo diario y mensual). Esto se hizo dividiendo en zonas el recinto como lo muestra la Figura 6 en los espacios que componen el colegio (salas de clases, oficinas, bodegas, etc.).
- Comparar el sistema de gestión de la energía del establecimiento con los requisitos que debiese tener uno de manera estándar según la norma ISO 50001.
- Cuantificar la demanda energética de la envolvente de una sala de clases. Esta demanda surge de la suma de las pérdidas de calor a través de la envolvente:

$$Q = Q_{\text{muros}} + Q_{\text{ventanas}} + Q_{\text{cielo}} + Q_{\text{puertas}} + Q_{\text{piso}} \quad (4)$$

Utilizando el principio de Fourier de transferencia de energía a través de la envolvente (Davies, 2004):

$$Q_i = U_i \cdot A_i \cdot (T_{ai} - T_{ae}) \quad (5)$$

donde, Q_i es el flujo de calor que pasa a través del elemento de la envolvente (W), A_i es el área del elemento de la envolvente (m^2), T_{ai} es la temperatura del aire interior ($^{\circ}C$), T_{ae} es la temperatura del aire exterior ($^{\circ}C$) y U_i es transmitancia térmica del elemento de la envolvente (W/m^2K). Esta última variable se

$$U = \frac{1}{R_{Si} + \sum \frac{e}{\lambda} + R_{Se}} \quad (6)$$

expresa dependiendo de su aplicación en el cielo, piso, muro, ventanas y puertas:

donde, U es la transmitancia térmica ($\text{W/m}^2\text{K}$), R_{Si} es la resistencia superficial del aire interior (m^2/WK), R_{Se} es la resistencia superficial del aire exterior (m^2/WK), e es el espesor del elemento a calcular (m) y λ es la conductividad térmica (W/mK) (MINVU, 2014). En caso de análisis de sistemas de transmitancia térmica de elementos heterogéneos se utiliza:

$$U = \frac{\sum U_t A_t}{\sum A_t} \quad (7)$$

donde, U es la transmitancia térmica (m^2/WK), A_t la superficie del elemento a la cual corresponda una transmitancia térmica U_t (MINVU, 2014). En el Liceo hay calefacción sólo en espacios interiores del LTP-ES de más uso por la comunidad escolar en salas de clases y oficinas de administración de uso diario:

- Salas de clases (numerada del 1 al 12).
- Oficina del director, Sala de profesores, Secretaría, Inspectoría, Inspectoría general, Comedor, Oficina Psicólogo, Laboratorio de computación, Sala de actividades nivel de transición 1 y 2.

Resultados

Confort térmico

La Tabla 3 muestra la satisfacción térmica de una sala de clases de este establecimiento. La oscilación de la temperatura ambiental en invierno entre 8:30 y 13:00 h al interior de la sala varió entre los 12.7 y 16.3 °C, lo cual está por debajo del estándar de confort térmico 22 ± 3 °C en invierno en aulas (AENOR, 2006). La temperatura promedio exterior al aula durante los días de medición fue de 17.3 °C, en cambio la temperatura interior del aula durante los mismos días fue 14.1 °C. Durante la mayor parte del tiempo de medición, la humedad relativa excedió el valor máximo recomendado para el interior del recinto (Minvu, 2018).

La Figura 7a muestra que la temperatura al interior del aula se incrementa a medida que transcurre la jornada, apreciándose fluctuaciones en la curva en los momentos de recreo (10:15 y 12:00 h) donde se observan una caída en la temperatura ambiental interior de la sala, ello se asocia a la inactividad de los individuos al interior, además

Tabla 3. Resultados obtenidos de las mediciones en la sala de clases N°8 del LTP-ES, con el medidor de estrés térmico.

Fecha	Día	Alumnos	Interior	Temperatura		Humedad relativa	
				Exterior Máximo	Mínimo	Interior	Exterior
26-07	viernes	22	14.1 ± 0.8	15 ± 0.1	4 ± 0.1	69 ± 3	88 ± 4
31-07	miércoles	23	16.3 ± 1.1	20 ± 0.1	4 ± 0.1	71 ± 6	87 ± 4
08-08	viernes	23	12.7 ± 1.5	20 ± 0.1	4 ± 0.1	60 ± 3	90 ± 3
12-08	lunes	23	12.8 ± 2.0	15 ± 0.1	0 ± 0.1	70 ± 3	87 ± 3
13-08	martes	23	13.6 ± 1.3	13 ± 0.1	2 ± 0.1	65 ± 3	85 ± 2
14-08	miércoles	22	13.4 ± 2.0	21 ± 0.1	2 ± 0.1	71 ± 3	81 ± 2
22-08	jueves	21	14.9 ± 1.3	19 ± 0.1	8 ± 0.1	69 ± 2	83 ± 2
29-08	jueves	23	16.0 ± 1.6	16 ± 0.1	4 ± 0.1	60 ± 2	86 ± 3
02-09	lunes	24	14.0 ± 1.2	16 ± 0.1	2 ± 0.1	54 ± 2	82 ± 2
03-09	martes	23	14.1 ± 2.0	18 ± 0.1	-1 ± 0.1	56 ± 4	73 ± 3

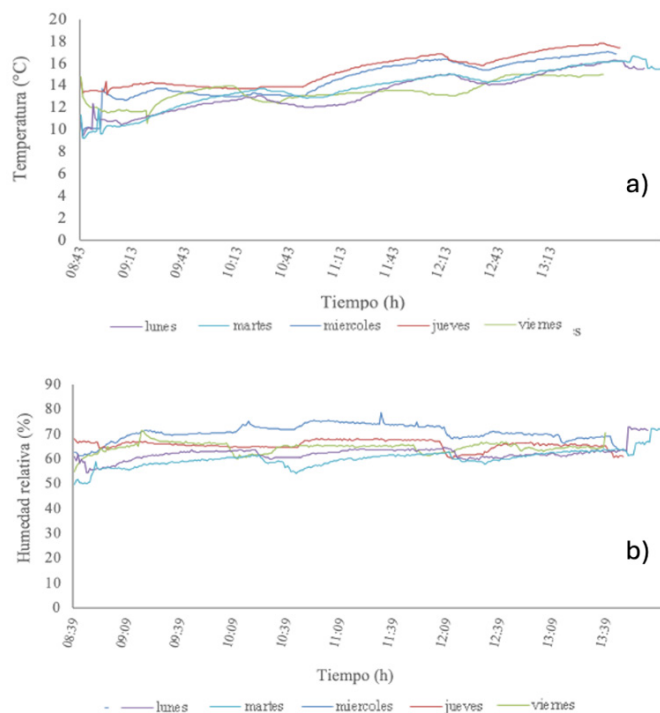


Figura 7. Representación gráfica de: a) la temperatura medida en el aula del LTP-ES. b) la humedad relativa medida en el aula del LTP-ES.

en la curva del viernes se aprecia un descenso entre 10:30 y 12:30 h (segundo bloque) debido a la clase de educación Física al exterior de la sala.

La Tabla 4 muestra la magnitud recomendada para los parámetros de estimación del confort térmico, donde la vestimenta es la estimación de acuerdo a la estación del año al interior de la sala, según el personal docente del establecimiento, se considera ropa interior (corta y larga), camisa o blusa (normal manga larga), pantalón largo normal, chaleco, calcetín largo, zapato y chaqueta. Con esto se completa una estimación de aislamiento de 1.5 clo ó 0.233 m²K/W. Por otro lado, la tasa metabólica considera que una actividad sedentaria (oficina, domicilio, escuela, laboratorio, industria ligera), es de 70 W/m² o 1.2 Met (Unión Europea, 2006). Estas tasas están dadas para personas jóvenes y adultas. Además, para la temperatura operativa se consideró un promedio de temperatura interior en la sala de clases medidas en el lugar, siendo 14.0 °C. Finalmente, la velocidad del aire es el promedio de las mediciones equivalente a 0.2 m/s.

Tabla 4. Valores de los parámetros por la actividad en el aula, según el criterio UNE-EN ISO 7730 (Unión Europea, 2006).

Parámetro	Valor	Unidad de medida
Vestimenta	0.233	m ² K/W
Tasa metabólica	70	W/m ²
Temperatura operativa	14.0	°C
Velocidad del aire	0.2	m/s

Con los valores anteriores se obtiene el IVM de -0.93, representando con ello el valor medio de la sensación térmica que emitirá un grupo de personas sometidas al mismo ambiente en el rango de -3 a 3 para una humedad relativa del aire de 50%. Corrigiendo la humedad relativa respecto al promedio de la humedad relativa del aire interior de la sala (64.5%), utilizando la ecuación 2 y 3 de la metodología, el nuevo IVM es -0.61 (considerando el FH: 0.007 y FR: 0.05).

El PPD que representa el porcentaje de insatisfacción de un grupo de personas es 13%. A través de los resultados del IVM y PPD, se obtiene la distribución de los votos de sensación térmica tal como lo señala la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la distribución de los votos de sensación térmica correspondiente al PMV y PPD obtenidos.

PMV	PPD	Porcentaje acumulativo de personas que se estima que voten por una escala de sensación térmica (%)		
	%	0	-1, 0, 1	-2, -1, 0, 1, 2
-0.61	13	50	87	97

Respecto a la sensación de confort térmico se estima según los resultados obtenidos que solo un 50% de las personas votan por un confort absoluto. A su vez, el 10% tiene sensación de "muy frío", lo cual implica que se puede estimar que las medidas de mejoramiento térmico permitirán que todas las personas en la sala alcancen una sensación térmica de confort.

Consumo Energético

Se realizó una recopilación de la información de consumo de energía eléctrica del LTP-ES a través de boletas de consumo eléctrico, para ello se consideraron los últimos dos años, con ello se pretende obtener la demanda por mes. Con el promedio de consumo eléctrico por mes de ambos años (Figura 8). La demanda máxima de energía eléctrica fue en el mes de junio con 7,378 kWh/mes, considerando 20 días de uso durante un mes y una jornada de 10 h (08:00 a 18:00 h), la demanda máxima promedio es de 37 kW.

La tarifa eléctrica que tiene el LTP-ES corresponde a una BT4.3, ello significa que esta tarifa separa los cobros por energía en potencia suministrada (demanda máxima del mes) y potencia en horas de punta. Habitualmente, son utilizadas por clientes que tienen la posibilidad de reducir su potencia demandada durante las horas de punta. El Liceo durante un periodo de 12 meses, presentó un gasto total en energía eléctrica de \$8,904,336 CLP.

También se cuantificó el gasto de gas del LTP-ES en un año. Considerando que el gas se utiliza en la cocina, el taller de cocina (especialidad del técnico profesional) y algunas estufas relacionadas a la calefacción de espacios (Tabla 7). Se estima que en un año se utilizan alrededor de 1,300 kg o 2.5 m³ de gas licuado.

Tabla 7. Gasto por consumo energético en gas del LTP-ES.

Ítem de gasto	Gasto anual aproximado (CLP)*
Cocina del Liceo	\$ 890,000
Taller de especialidad	\$ 267,000
Gas de 45 kg para oficina de Adm.	\$ 162,000
Gas de 15 kg para estufas	\$ 132,000
Gas de 5 kg para estufas	\$ 92,000
Total	\$ 1,543,000
*1 US\$ = \$900 CLP	

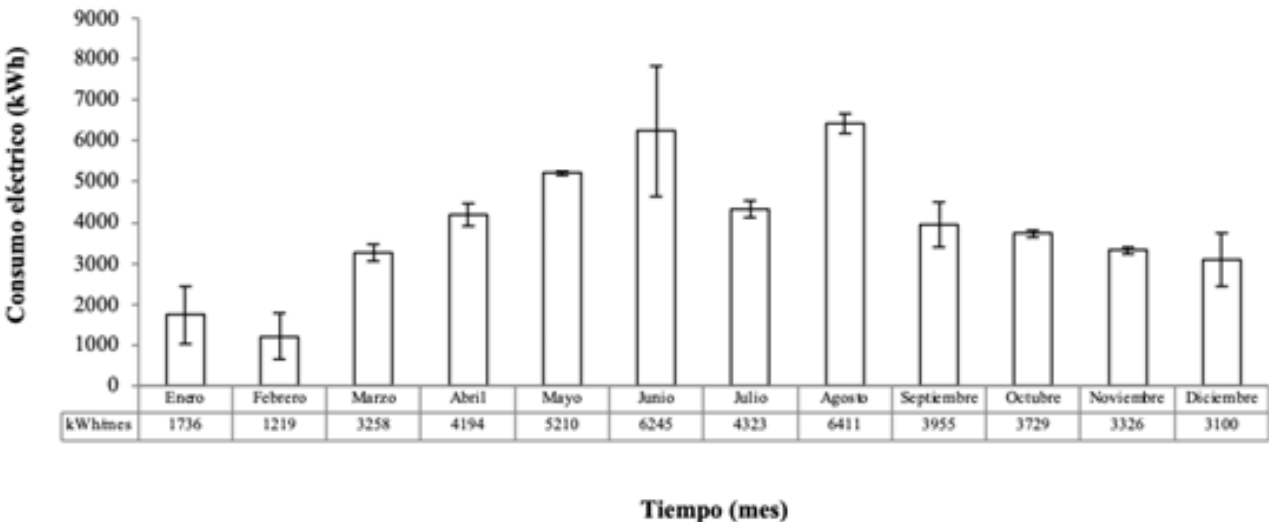


Figura 8. Representación gráfica del promedio de consumo eléctrico del LTP-ES durante dos años y la desviación estándar correspondientemente.

Potencia instalada

Se realizó un diagnóstico de la potencia instalada del LTP-ES considerando cuantificar los consumos de climatización, iluminación, electrodomésticos, entre otros. Esto se presenta en la Tabla 8. Con ello se determinó el tamaño del equipo de cogeneración adecuado para cubrir la demanda energética del LTP-ES. Las potencias consideradas para la estimación están fijadas según los equipos o electrodomésticos que actualmente se cotizan en el mercado. Respecto a la recopilación realizada, la potencia máxima es de 63.4 kW, siendo el 94.3% en equipos de climatización. Por otro lado, de acuerdo con el levantamiento de la información del consumo eléctrico mediante la revisión del detalle en las boletas de consumo, se observa que la demanda promedio máxima de potencia suministrada mensual es 49.7 kW, mientras que la demanda promedio de potencia suministrada mensualmente en hora punta está entre 14 y 20 kW.

Tabla 8. Resumen de estimación de potencia en las zonas designadas en el LTP-ES.

Zonas	Potencia de Iluminación (kW)	Potencia de Corriente (kW)
Zona 1	0.32	5.4
Zona 2	0.76	14.6
Zona 3	1.12	17.9
Zona 4	0.88	17.8
Zona 5	0.84	7.7
Total	3.92	63.4
Zona 1: aulas 7 y 8, oficinas y bodega; Zona 2: comedor, cocina y oficinas; Zona 3: aulas 1, 2, 3 y 4, sala de actividades y biblioteca; Zona 4: aulas 5 y 6, taller, laboratorio, oficinas y baños; Zona 5: aulas 9, 10, 11 y 12, y baños.		

Transmitancia térmica

La materialidad de construcción del establecimiento es de albañilería armada con pilares y cadenas de hormigón armado, estucada por exterior e interior enlucido de yeso. Unidad de ladrillo Santiago Te 7 con mortero de pega (1.5 cm

de yaga y tendel) más estuco de mortero exterior de 2 cm de espesor y enlucido de yeso interior del muro con espesor de 1.5 cm. Esta secuencia de materialidad está descrita en el código 1.2.M.B8.2 del “Listado oficial de soluciones constructivas para el acondicionamiento térmico” (Minvu, 2007), donde resulta una resistencia térmica de 0.59 m²K/W y transmitancia térmica de 1.69 W/Km². Luego, la transmitancia térmica para los elementos de hormigón armado (λ : 1.63 W/mK) de 20 cm de espesor, más el enlucido de yeso (λ : 0.44 W/mK) y estuco de mortero (λ : 1.40 W/mK) (MINVU, 2014), se obtiene con la ecuación (6). Con base a los valores de las superficies pilares y cadenas (1.06 m²) y de la superficie de muro albañilería (6.44 m²) se realiza la ponderación de 14 % y 86 % según corresponda para el cálculo de la transmitancia total del muro, mediante la ecuación (7). La ecuación (6) permite determinar la transmitancia térmica del complejo constructivo ventanas de vidrio monolítico incoloro, cristal simple de 3 mm de espesor y marco de aluminio color gris (ver Figura 9).

La ecuación (6) permitió determinar la transmitancia térmica del complejo constructivo de la estructura del cielo que está conformada por cerchas de madera cepillada de 1" x 4", un sistema de empalizado de madera 2" x 2" con un cuadrículado de 40 x 40 cm da soporte al revestimiento de cielo, el cual correspondiente a yeso cartón normal de 1.5 cm. La aislación es de poliestireno expandido de 5 cm de espesor dispuesto en los cuadrados de 40 x 40 cm que forma el empalizado. La ecuación (6) permite determinar la transmitancia térmica del complejo constructivo de la puerta que corresponde a un materialidad de pino macizo. Finalmente, conociendo la transmitancia térmica de la envolvente se calcula el flujo de calor que se transfiere por esta, contemplando una temperatura interior en la sala de 295.2 K (22 °C) cumpliendo con ello el confort térmico, además se considera para el exterior de la sala una temperatura mínima promedio de invierno de 276.4 K (3.2 °C) (Tabla 9).

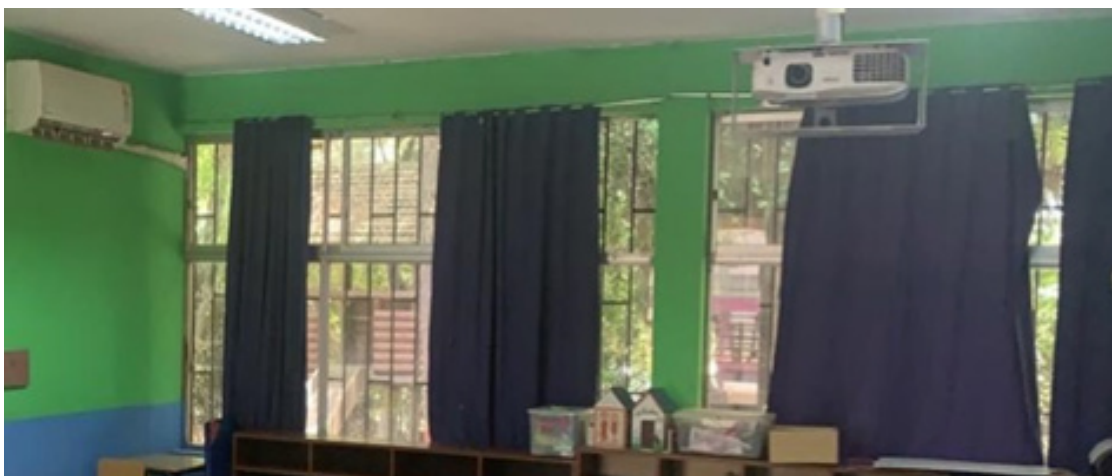


Figura 9. Fotografía de las ventanas de la sala de clases.

Tabla 9. Resumen de los resultados del flujo de energía transferida en la sala de clases.

Elemento	Superficie (m ²)	Temperatura (K)		Diferencia de temperatura (K)	Transmitancia térmica (W/m ² *K)	E n e r g í a traspasada (W)
		Interior	Exterior			
Muros perimetrales con el exterior	28.8	295.2	276.4	18.8	1.85	1,001.6
Muros perimetrales con el interior	30.0	295.2	295,2	0.0	1.85	0.0
Cielo	48.0	295.2	276,4	18.8	0.87	785.1
Ventanas	11.2	295.2	276,4	18.8	5.80	1,221.2
Puerta	1.8	295.2	276,4	18.8	1.54	52.1
					Total (W)	3,060

El flujo de energía total transferido por los componentes de la sala (cielo, muro, ventana y puerta) es equivalente a la energía que se necesita al interior de ella para mantener la temperatura de confort en un día de invierno, (22 °C al interior de la sala de clases y 3.2 °C al exterior de esta) la cual asciende a 3.06 kW. La tasa de calefacción se obtiene dividiendo la energía total necesaria para mantener la temperatura de confort en invierno por los metros cuadrados de la sala de clase en cuestión, dando así 63.8 W/m². Por lo tanto, sabiendo que la superficie total que será calefaccionada es 989 m², entonces la energía calórica total es de 63.1 kW.

Conclusiones

En relación con la demanda energética del LTP-ES, se observó que el confort térmico estudiado permitió visualizar la satisfacción térmica de una sala de clases del Liceo rural, donde el 50% de estudiantes están en la condición máxima de satisfacción térmica y un 13% en condición de insatisfacción térmica.

Mediante la recopilación de consumo eléctrico se logró determinar que en el mes de junio se produce el mayor consumo de electricidad en el Liceo con 7,378 kWh/mes, de acuerdo al levantamiento de la información del consumo eléctrico, en la revisión del detalle en las boletas de

consumo, se observó que la demanda promedio máxima de potencia suministrada mensual fue de 49.7 kW, mientras que la demanda promedio de potencia suministrada mensualmente en hora punta está entre 14 y 20 kW.

Se determinó que la energía que necesita una sala para mantener el confort térmico en invierno equivale a 3.06 kW (22 °C al interior de la sala de clases y 3.2 °C al exterior de esta). También se obtuvo la transmitancia térmica de muros la cual está al límite de acuerdo con lo que establece la OGUC (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones) y por debajo de lo señalado por el PPDA (Plan de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica) para Talca.

Los hallazgos de este estudio permiten proponer soluciones de aislación térmica en los lugares de estudio, para luego idear una solución tecnológica basada en la recuperación de residuos orgánicos del sector rural, que permita al Liceo ser independiente energéticamente.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a la red de eficiencia térmica industrial RIETI-CYTED por brindarnos la invaluable oportunidad de compartir experiencias en el campo de las energías renovables y enriquecernos con los conocimientos aportados por los estudios realizados en las instituciones colaboradoras. Asimismo, agradecemos al Dr. Efraín Gómez y a un revisor anónimo las observaciones a nuestro manuscrito, las cuales ayudaron a mejorar el documento.

Referencias

- López-Chao, V.A. (2016). El impacto del diseño del espacio y otras variables socio-físicas en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Tesis de Doctorado, Universidad de Coruña, España, 559 pp. <https://core.ac.uk/download/pdf/75988539.pdf>
- Aeonor (2006). Ergonomía del ambiente térmico. Une-en 7730:2005
- Alhilli, H.K., Burhan, A.M. (2021). Developing a system for assessing the sustainability in school building projects. *Environment Development and Sustainability*, 23(12), 17483-17502. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01397-x>
- Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y., Barrett, L. (2015). The impact of classroom design on pupils' learning: final results of a holistic, multi-level analysis. *Building and environment*, 89, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.013>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5, 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Brodar, E. E., Ruivo, C. R., Da Silva, M. G. (2020). The use of Monte Carlo Method to assess the uncertainty of thermal comfort indices PMV and PPD: benefits of using a measuring set with an operative temperature probe. *Journal of building engineering*, 101961. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101961>
- Campano, M. A., Pinto, A., Acosta, I., Muñoz-González, C. (2017). Analysis of the perceived thermal comfort in a portuguese secondary school: methodology and results. *Int. J. Eng. Technol*, 9, 448-455. <https://doi.org/10.7763/ijet.2017.v9.1015>
- Castejón, E. (1983). Documentación NTP 74 : confort térmico - Método de Fanger para su evaluación. Notas técnicas de prevención. Insht, 1–14.

- Davies, M. G. (2004). Building Heat Transfer. John Wiley & sons, England. ISBN 0-470-84731-x
- De Dear, R., Xiong, J., Kim, J., Cao, B. (2020). A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy and buildings*, 214, 109893. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>
- González-Galvez, O., Morales, M., Seefoó, C., Morillón, D., Valdés, H. (2018). Energy diagnosis of university buildings: Renewable Energy Institute from UNAM. *Buildings*, 8(10), 136. <https://doi.org/10.3390/buildings8100136>
- Holopainen, R., Tuomaala, P., Hernandez, P., Häkkinen, T., Piira, K., Piippo, J. (2014). Comfort assessment in the context of sustainable buildings: comparison of simplified and detailed human thermal sensation methods. *Building and environment*, 71, 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.009>
- Lamberti, G., Salvadori, G., Leccese, F., Fantozzi, F., Bluysen, P. M. (2021). Advancement on thermal comfort in educational buildings: current issues and way forward. *Sustainability*, 13(18), 10315. <https://doi.org/10.3390/su131810315>
- Martínez-Molina, A., Boarin, P., Tort-Ausina, I., Vivancos, J. L. (2017). Post-occupancy evaluation of a historic primary school in Spain: comparing PMV, TSV and PPD for teachers' and pupils' thermal comfort. *Building and environment*, 117, 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.010>
- MINVU (2018). Estándares de Construcción Sustentable para viviendas de Chile. Gobierno de Chile. 1, 182.
- MINVU (2014). Norma chilena 853: acondicionamiento térmico - envolvente térmica de edificios - cálculo de resistencia y transmitancia térmicas. Gobierno de Chile.
- MINVU (2007). Listado oficial de soluciones constructivas para acondicionamiento térmico. Gobierno de Chile. 3582.
- Paul, W. L., Taylor, P. A. (2008). A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building. *Building and Environment*, 43(11), 1858-1870. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.006>
- Peterssen-Soffia, G. (2020). Los materiales de construcción, su ausencia en la certificación de edificio sustentable (CES), Chile. *Arquitectura y Urbanismo*, 41(2). ISSN 1815-5898.
- Rodríguez, C. M., Coronado, M. C., Medina, J. M. (2021). Thermal comfort in educational buildings: the classroom-comfort-data method applied to schools in Bogotá, Colombia. *Building and Environment*, 194, 107682. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107682>
- Salazar-Vera, C. (2022). Satisfacción de ocupantes en edificios de oficina certificados verde: análisis de los parámetros de calidad del ambiente interior utilizados en edificios certificados CES en Chile. Tesis de magister en hábitat sustentable y eficiencia energética, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile, 113 pp. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/4133>
- Ter-Mors, S., Hensen, J.L.M., Loomans, M.G.L.C., Boerstra, A.C. (2011). Adaptive thermal comfort in primary school classrooms: creating and validating pmv-based comfort charts. *Building and environment*, 46(12), 2454-2461. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.025>

Trebilcock, M. (2020). Inauguración del Seminario Internacional. Seminario Internacional “Resiliencia y Sustentabilidad: El rol de los Edificios Escolares”. Magíster en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética y Doctorado en Arquitectura y Urbanismo, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bio-Bio. Concepción, Chile.

Unión Europea (2006). Norma europea 7730 determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. Norma aprobada por CEN el 21 de octubre 2005. El texto de la norma ha sido elaborado por el comité técnico iso/tc 159 ergonomía en colaboración con el comité técnico cen/tc 122 ergonomía, cuya secretaría está desempeñada por DIN. Octubre de 2006, núm. 7730, 1-60.

Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: a review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 895-906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>

Manuscrito recibido: 9 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 12 de noviembre de 2024

Manuscrito aceptado: 22 de noviembre de 2024

Diseño y construcción de un prototipo de evaporador solar para deshidratación de lactosuero

Ricardo Musule Lagunes^{1*}, Jorge Arturo Del Ángel Ramos²

¹Instituto de Investigaciones Forestales, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

²Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

*musuleiq@gmail.com, rmusule@uv.mx

Resumen

Se diseñó y construyó un evaporador solar térmicamente autosuficiente. Nuestro objetivo fue desarrollar una unidad de evaporación innovadora alimentada por energía solar. Nuestro evaporador se diseñó para llevar a cabo la deshidratación del suero de leche, que es un subproducto de la fabricación del queso. En México, el lactosuero se vierte de manera indiscriminada como efluente en el sistema de alcantarillado y cuerpos de agua, lo que provoca contaminación del agua. Al mismo tiempo, los nutrientes que contiene (lactosa, proteínas y ácidos grasos) se desperdician cuando podrían tener otros usos, como transformarse en alimentos para humanos y animales. Nuestro prototipo es una alternativa que busca ser sostenible para la deshidratación y la producción de suero de leche concentrado. Además, nuestro evaporador solar podría ayudar a la industria quesera a cumplir la legislación medioambiental vigente. La utilidad de nuestro prototipo dependerá de su escalado industrial y de su mejora y adaptación a las necesidades particulares del lugar donde se vaya a utilizar.

Palabras clave: Deshidratación de lactosuero, Evaporador solar, Tratamiento de efluentes agroindustriales, Residuos de quesería.

Abstract

A thermally self-sufficient solar evaporator was designed. Our goal was to produce an innovative processing unit powered by solar energy. Our evaporator was designed to carry out the dehydration of whey, which is a by-product of cheese manufacturing. At present, whey is dumped into bodies of water indiscriminately causing pollution of water. Moreover, the nutrients contained in whey (lactose, proteins, and fatty acids) are wasted instead of transforming them into food for humans and animals. Our prototype is a sustainable alternative to dehydration and production of condensed whey. Additionally, our solar evaporator could help the cheese industry by helping it to fulfill the current environmental law. The usefulness of our prototype will depend on its industrial scaling, improvement and adaptation to the needs of the place where it will be used.

Key words: Whey dehydration, Solar evaporator, Agro-industrial effluent treatment, Cheese factory waste.

Introducción

El lactosuero es un residuo lácteo resultante de la producción de queso y es una de las sustancias más contaminantes de la industria alimentaria. Además, no procesar el lactosuero para utilizarlo como alimento supone un desperdicio considerable de nutrientes (Chegini y Taheri, 2013; Ozel Et al. 2022). Si el suero no se procesa, se desperdicia casi el cincuenta por ciento de los nutrientes de la leche. Así pues, es importante que los productores de queso encuentren formas de procesar el lactosuero para reducir la contaminación y conseguir una mayor recuperación del valor monetario de este residuo (Cunningham, 2000).

Millones de toneladas de suero de queso son producidas alrededor del mundo. Estados Unidos, Francia, Alemania e Italia son los principales productores mundiales de queso y suero de leche. La tasa de producción anual de suero es de unos 121 millones de toneladas al año (Petrucchioli et al. 2019; Ozel et al. 2022). En el año 2006, se estimó que un millón de toneladas de suero de leche fue producido en México y cerca 45% de todo este lactosuero fue vertido a los sistemas de alcantarillado, llegando a cuerpos de agua y al suelo (Valencia y Ramírez, 2009).

En el Estado de Veracruz, para el año 2016, la producción del lactosuero fue de aproximadamente 354,227 litros provenientes de leche de vaca (De la Cruz, 2018; Torres-Martínez y Romero-León, 2020). La problemática de contaminación del agua por vertido de lactosuero en el estado y particularmente en municipios alrededor de la ciudad de Xalapa ha sido previamente abordada en la literatura (Torres-Martínez y Romero-León, 2020; Flores-Mendoza Et al. 2020). En contraste, el 90% del lactosuero generado en Estados Unidos en 2001 (más de 500 mil toneladas) se utilizó para producir ingredientes para alimentos de consumo humano. La mayor parte de estos alimentos se exportó a países donde aún no se procesa el lactosuero, lo que generó plusvalías

por el procesamiento del lactosuero para Estados Unidos (Cancino et al. 2006).

El valor nutritivo del lactosuero depende de su composición y principalmente de su contenido en materia seca. El alto contenido de agua en el lactosuero sin procesar representa una desventaja importante, ya que sus costos de transporte pueden hacer que su procesamiento sea poco práctico (Khetni, 2018). Además, el alto contenido de agua en el lactosuero limita su consumo (Abaigar, 2003). Los métodos más utilizados para concentrar el lactosuero son el uso de membranas filtrantes (microfiltración y ultrafiltración) y la evaporación al vacío (Serpa et al. 2005), siendo este último de interés en el presente trabajo de investigación.

Los evaporadores que se utilizan actualmente requieren suministros de energía convencionales (incluidos combustibles y electricidad) para funcionar. También requieren de sitios con condiciones especiales, sistemas de control y una ubicación física fija. Todo ello implica costos de inversión y mantenimiento cuando se pone en marcha la tecnología de evaporación convencional para la concentración del lactosuero (Geankiplis, 2007; McCabe y Smith, 2007; Perry y Green, 2008).

La tecnología de evaporación solar para el tratamiento de efluentes industriales ha sido ampliamente estudiada alrededor del mundo (Nadal-Bach et al. 2021; Pandey et al. 2021). Sin embargo, son escasos los reportes de desarrollo de tecnología para la evaporación solar de suero de leche. Entre los pocos trabajos que destacan novedosos procedimientos se encuentra el informe de Souza et al. (2008) en Brasil, utilizando un proceso de microfiltración. Los procesos de ultrafiltración y evaporación al vacío para la concentración de proteína de suero de leche por Serpa et al. (2005) y una actual tecnología alternativa para la concentración de este subproducto, es un proceso de concentración por congelación (Cochachin-Carrera et al.

2023). Por otra parte, investigaciones acerca del aprovechamiento de la energía solar en la industria de la leche se han incrementado, destacándose el diseño de un sistema solar térmico en España por Quijera et al. (2010), y los reportes de los sistemas de integración de tecnología que usan energía solar en los procesos de la industria láctea (Pirasteh et al. 2014; Masera et al. 2023).

Con relación al uso del lactosuero a nivel nacional, destacan las investigaciones reportadas por Gómez Alcántara et al. (2009), quienes trataron de encontrar una solución técnica al lactosuero en el estado de Hidalgo, México, y realizaron algunas investigaciones sobre el diagnóstico y tratamiento del residuo. En la actualidad, se ha reportado el uso potencial del lactosuero para el desarrollo de biorrefinerías a base de microalgas para la generación de múltiples productos de alto valor agregado (Najar-Almanzor et al. 2023).

El objetivo de este trabajo fue diseñar un prototipo de evaporador solar térmicamente autosuficiente para concentrar lactosuero de la producción de queso en Xalapa, Veracruz, México. A partir de lo señalado, debemos

preguntarnos ¿Es posible diseñar y construir un evaporador solar térmicamente autosuficiente, con la finalidad de deshidratar el lactosuero para obtener una concentración final del 15%?

Metodología

Se instaló un prototipo de evaporador solar térmicamente autosuficiente en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana, región Xalapa, México, en las siguientes coordenadas: 19° 30' 43" norte, 96° 54' 14" oeste. Los cuatro pasos de diseño fueron los siguientes: 1) Descripción del prototipo, 2) obtención de datos de la radiación solar en Xalapa, Veracruz, México, 3) mediciones y cálculos de diseño y 4) diseño y construcción del prototipo.

Descripción del prototipo

La Figura 1 muestra el evaporador solar diseñado, que se compone de seis elementos principales: (1) Colector solar plano, (2) serpentín de intercambio de calor, (3) tanque de evaporación, (4) bomba de vacío, (5) bomba de circulación y (6) contenedor de concentrado.

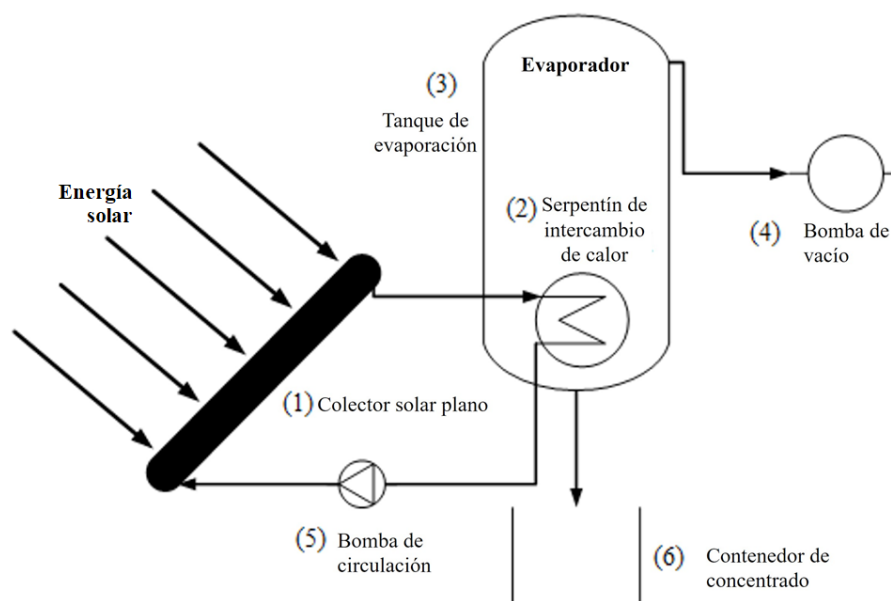


Figura 1. Elementos del prototipo de evaporador solar.

(1) Colector solar plano. El sistema de calentamiento se utiliza para aprovechar la energía de la radiación solar que se emplea como energía térmica para hacer que la sustancia a evaporar alcance su temperatura de saturación e inicie el proceso de evaporación.

(2) Serpentín de intercambio de calor. El objetivo principal del serpentín de intercambio de calor es transferir calor al suero mediante contacto indirecto, es decir, el fluido caloportador (agua) llena el serpentín, que transfiere su energía térmica al suero para que pueda tener lugar el proceso de evaporación.

(3) Tanque de evaporación. El tanque de evaporación sirve para contener tanto el suero a evaporar como el serpentín de intercambio de calor. El cuerpo del tanque es un recipiente hermético que permite el funcionamiento a presión de vacío.

(4) Bomba de vacío. Esta bomba sirve para eliminar las moléculas de gas del tanque de evaporación y proporcionar un funcionamiento a presión de vacío.

(5) Bomba de circulación. La función principal de este elemento es contribuir a la transferencia de calor por convección forzada. Se colocó entre el colector solar plano y el serpentín de intercambio de calor.

(6) Contenedor de concentrado. La función principal de este tanque era contener y almacenar el suero concentrado tras el proceso de evaporación.

Obtención de datos de la radiación solar en Xalapa, Veracruz, México

Se utilizaron datos meteorológicos históricos de la estación 0030228 en Xalapa, Veracruz, México, proporcionados por Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de 1971 a 2011 (SMN, 2011).

Para establecer el recurso solar en Xalapa se utilizaron los siguientes parámetros: irradiación, número de días nublados y temperatura media. Además, se consultaron los datos de NASA Surface Meteorology and Solar Energy Locate RetScreen Data de la National Aeronautics and Space Administration (NASA); se ingresaron las coordenadas del lugar de estudio para obtener los datos de energía solar típicos de la zona (NASA, 2010). Los datos del SMN y de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy Locate RetScreen Data fueron analizados en una hoja de cálculo de Excel para estimar el recurso solar y el potencial típico de energía solar en Xalapa, Veracruz por mes y por estación del año.

Mediciones y cálculos de diseño

Los cálculos de diseño del prototipo consistieron en la aplicación y adaptación de métodos y ecuaciones matemáticas para apoyar el dimensionamiento y la predicción del funcionamiento del prototipo. Como parte de las consideraciones de diseño, se realizaron mediciones y análisis fisicoquímicos del lactosuero que se produce en la región. Los análisis y mediciones se realizaron bajo condiciones atmosféricas en Xalapa, Veracruz. Los parámetros medidos fueron: densidad absoluta, pH (parámetro considerado de interés debido a su relación con el fenómeno de corrosión en equipos industriales de procesamiento) y punto de ebullición.

Para la medición de la densidad absoluta de la muestra de lactosuero se utilizó un hidrómetro regular para líquidos pesados, para la medición del pH se utilizó un potenciómetro Lutron modelo pH-207 (precisión de 0.01 pH). Para delimitar el punto de ebullición se utilizó una placa calefactora Barnstead Thermolyne modelo 1900. Sobre esta placa calefactora se colocó un vaso de precipitados de vidrio con un volumen de 250 ml, donde se midió un volumen de 250 ml de suero de leche. El punto de ebullición se determinó utilizando un termómetro de mercurio

Branan con capacidad de 150°C. Las mediciones experimentales se realizaron por triplicado.

Diseño y construcción del prototipo

Para completar los cálculos de dimensionamiento del prototipo de evaporador solar se determinaron cuatro apartados principales:

I) El volumen de agua a evaporar. Se calculó la concentración de masa drenada, la densidad y la masa de la solución (Chang, 2007). En primer lugar, se calculó la concentración de masa drenada, para lo cual fue necesario delimitar el soluto y la solución de suero en gramos utilizando el método de secado (AOACEU, 1990). De la misma manera se calculó la densidad de la solución. Para el cálculo del soluto de la solución se aplicó por triplicado el siguiente procedimiento:

1. En una balanza analítica marca Adventurer modelo AR2140 se pesó un vaso de precipitado de 50 ml vacío.

2. Se adicionaron 40 ml de muestra de lactosuero al vaso de precipitado y se volvió a pesar; se restaron los gramos del peso del vaso y se obtuvo la masa de la solución de lactosuero.

3. Se sometió a calentamiento el vaso de precipitado conteniendo la solución para evaporar toda el agua de la muestra de lactosuero, con una parrilla de calentamiento marca Barnstead Thermolyne modelo 1900. Se controló la evaporación en todo momento para que no ocurriera pérdida de muestra.

4. Una vez que la muestra quedó completamente seca, se procedió a dejar enfriar el vaso de precipitado y se pesó nuevamente en la balanza analítica con lo que se obtuvo la masa en gramos del soluto.

5. Se calculó la concentración de masa de la muestra y la densidad de la muestra.

6. Conociendo de antemano la concentración a la que se desea llegar (15% de masa seca), se calculó la masa de la solución a dicha concentración.

7. Se colocó el vaso de precipitado con el soluto seco en la balanza y se fue adicionando agua destilada hasta llegar al peso deseado (paso 6).

8. Se observó el volumen que correspondió al peso del paso 6 y se calculó nuevamente la densidad.

Se realizó el cálculo del volumen a evaporar de agua a una concentración final del 15% de masa seca y un volumen inicial (carga de alimentación) de 10 litros.

II) Con una bomba de vacío se calculó la presión de vacío (Cengel, 2009). En cuanto a los cálculos en este parámetro, fue necesario definir la temperatura de operación del proceso de evaporación (40°C), temperatura recomendada para no degradar los nutrientes del lactosuero (Requena y Gómez, 2004). Después se investigó la presión absoluta (presión manométrica) proporcional a dicha temperatura y por último se realizó el cálculo de la presión de vacío, conociendo de antemano la presión atmosférica de Xalapa (0.84 KPa), utilizando las variables termodinámicas del lactosuero como las del agua debido a su elevada dilución.

III) Sistema de calefacción por colector solar plano. Se efectuaron cálculos de la eficiencia del colector, calor sensible (Perales, 2007), calor de evaporación y calor latente (Cengel, 2009). El objetivo primordial fue determinar el área superficial de captación del colector solar plano necesaria para la demanda de energía térmica en la ubicación de operación. Se utilizaron los datos de irradiancia promedio del Surface Meteorology and Solar Energy para Xalapa, así como la eficiencia más cercana de los captadores solares planos, es decir, 50% de eficiencia (Perales, 2007). Se calculó el calor de evaporación que correspondió a la demanda de energía térmica

del proceso de evaporación con las condiciones de operación esperadas en el prototipo, nuevamente se consideraron los parámetros termodinámicos del lactosuero equivalentes a los del agua. El calor latente fue determinado y se multiplicó por el volumen de agua a evaporar calculado en el apartado I. Igualmente, el calor sensible fue calculado y el flujo volumétrico correspondió a la carga de alimentación por día elevando la temperatura de la carga de 14°C a 40°C.

IV) Cálculos del intercambiador de calor. Diámetro de tubería (Perales, 2007), número de Reynolds, Nusselt (circulación forzada), coeficiente de transferencia de calor por convección, primera ley de la termodinámica aplicada en una tubería (Manrique, 1984). Los cálculos consistieron en determinar el diámetro y la longitud del tubo que conformó al serpentín. En primer lugar, fue calculado el diámetro de la tubería utilizando una constante para la tubería de cobre de 2.2 y un caudal típico para colectores solares planos de 0.132 m³/h (Perales, 2007).

Posteriormente, se calculó el número de Reynolds, utilizando propiedades del agua a la temperatura de operación que fueron las siguientes: densidad = 994.59 Kg/m³, calor específico = 4.1784 x 10³ J/kg.K, viscosidad cinemática = 0.658 x 10⁻⁶ m²/s y un flujo másico de 10 kg/min. Con el Número de Reynolds se determinó el tipo de flujo y se calculó el Número de Nusselt y un Número de Prandtl = 4.34. Con los números de Reynolds y el de Nusselt se calculó el coeficiente de transferencia de calor conociendo la conductividad térmica del agua = 0.628 W/mK. Por último, se determinó la longitud de la tubería aplicando la primera Ley de la Termodinámica al tubo y mediante los datos encontrados en los pasos anteriores.

Utilizando los datos de los pasos anteriores, se realizó la construcción del prototipo, la cual consistió en la selección y adquisición de los equipos y materiales que posteriormente sirvieron para el ensamblaje del prototipo y su conformación. Adicionalmente, las tuberías del sistema de calefacción al tanque evaporador se aislaron con espuma de polietileno para minimizar pérdidas de calor.

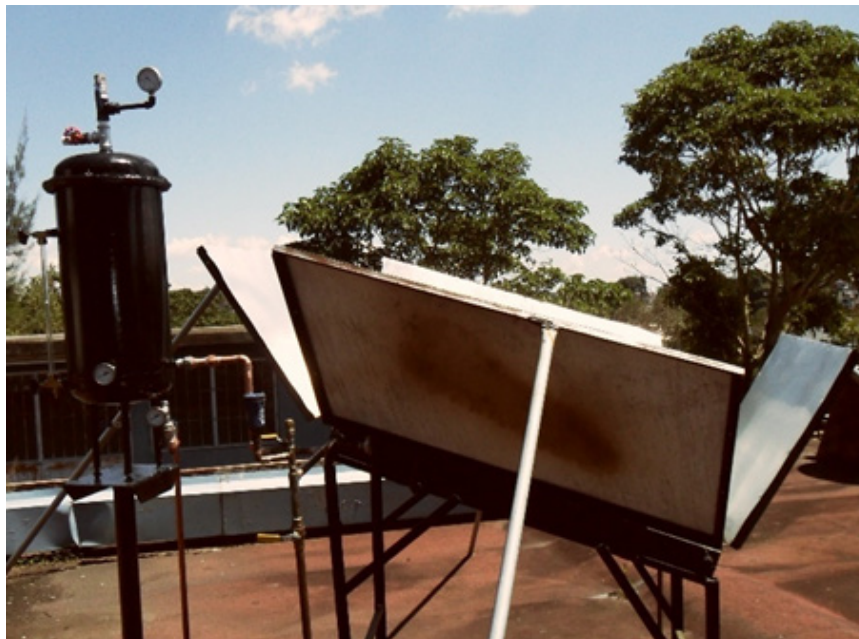


Figura 2. Prototipo de evaporador solar. (Fotografía de Ricardo Musule, 2010, archivo particular).

Resultados

Características y descripción del prototipo

En la Figura 2 se muestra el prototipo evaporador solar que se diseñó e instaló en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana región Xalapa:

Las especificaciones por elemento son las siguientes:

- *Captador solar plano:* Se instaló un colector solar plano de dimensiones 1.2 x 0.75 m, constituido por vidrio templado y tuberías aletadas pintadas de color negro. Adicionalmente, cuenta con reflectores autoajustables para el mejor aprovechamiento de la radiación solar difusa de la zona. El líquido de calefacción empleado fue agua.
- *Intercambiador de calor:* Dentro del cuerpo del evaporador se implementó un serpentín de tubería de cobre (aproximadamente 1/2" de diámetro) por el que circuló el líquido de calefacción proveniente del captador solar.

- *Cuerpo del evaporador:* Se adaptó un tanque de material férreo con un volumen aproximado de 40 litros, donde se instalaron las respectivas válvulas de alimentación y descarga, los instrumentos de medición (termómetro, vacuómetro y control de nivel) y el intercambiador de calor en forma de serpentín en su interior, se bridó con ocho tornillos y se utilizó empaque para poder cerrar herméticamente y al final se pintó de color negro.

- *Bomba de vacío:* Se utilizó una bomba de vacío de ½ HP marca AVALY modelo VA-50N para generar la presión de operación dentro del cuerpo del evaporador.

- *Bomba de circulación:* Se instaló una bomba de circulación de ¾" y 1/25 HP marca Grundfos modelo UP15-10SU7P/TLC en las tuberías del sistema de calefacción para favorecer el intercambio de calor.

- *Contenedor del concentrado:* Se adquirió un recipiente plástico de 10 litros para depositar el concentrado al término del proceso de evaporación.

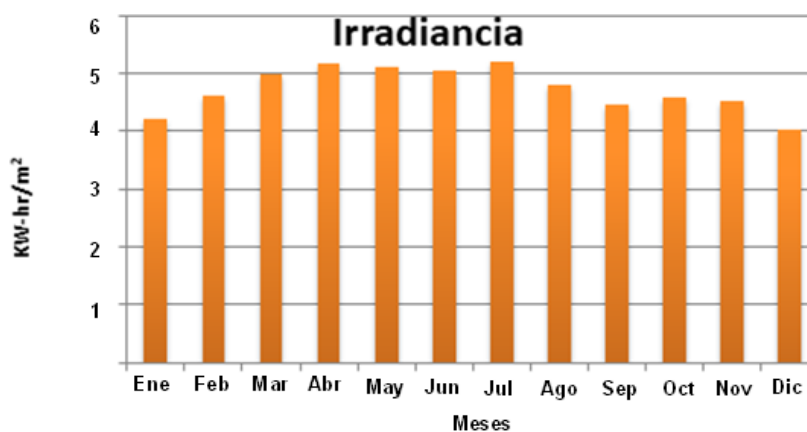


Figura 3. Comportamiento mensual de la irradiancia en Xalapa. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de 1971 a 2011 (SMN, 2011).

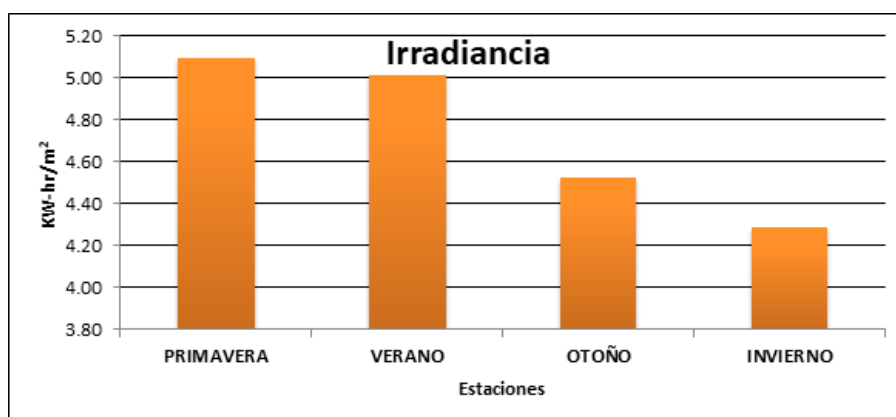


Figura 4. Comportamiento estacional de la irradiancia en Xalapa. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de 1971 a 2011 (SMN, 2011).

Estimación del recurso solar de Xalapa

En la Figura 3 se muestra el comportamiento mensual de la irradiancia en Xalapa.

Similarmente, se muestra el comportamiento estacional de la irradiancia en Xalapa (Figura 4).

Realización de mediciones y cálculos para el diseño

En la Tabla 1, se muestran los resultados de las mediciones y análisis fisicoquímicos realizados a

la muestra de lactosuero producido en la región.

Cálculos de diseño por apartados

Volumen de agua a evaporar. En la Tabla 2, se muestran los resultados del método de pérdida de peso por secado utilizado para determinar la concentración de masa seca del lactosuero producido en la región.

Por último, la Tabla 3 resume los resultados de los cálculos de diseño para el prototipo evaporador solar.

Tabla 1. Mediciones y análisis fisicoquímicos

Parámetro	Instrumento de medición	Valor	Unidad
Densidad absoluta	Densímetro	1.02	g/ml
pH	Tiras reactivas	4 a 5	-
	Potenciómetro	4.4	-
Punto de ebullición	Termómetro de Hg	96	°C

Tabla 2. Determinación de la concentración de masa seca del lactosuero y otros parámetros

Concepto	Valor	Unidad
Densidad lactosuero diluido	0.97	g/ml
Concentración en masa seca	8.50	%
Densidad del lactosuero concentrado (15% MS)	1.09	g/ml
Volumen de agua a evaporar	5.00	l
Equivalencia de Kg de agua a evaporar	4.25	Kg

Tabla 3. Resultados de cálculos de diseño para el prototipo evaporador solar

Concepto	Valor	Unidad
Presión de operación (vacío)	78.20	kPa
Calor sensible	0.30	Kwh/carga
Calor latente	2.84	Kwh/carga
Calor de evaporador	3.14	Kwh/carga
Área de captación	1.56	m ²
Diámetro de tubería	1.15	cm
Reynolds	21623.37	-
Nusselt	121.52	-
Coeficiente de transferencia de calor	5087.80	w/m ² k
Longitud de tubería (intercambiador de calor)	1.510	m

Discusión

Con base en el apartado anterior, se logró el diseño y la construcción de un prototipo de evaporador solar, basado en el procesamiento de lactosuero. Sin embargo, analizando los datos del recurso solar (Figuras 3 y 4), se puede observar que el recurso solar decrece claramente en las estaciones de otoño e invierno y, considerando también que las temperaturas ambientales también disminuyen, se puede esperar un comportamiento discontinuo de la fuente energética, lo que puede impedir la factibilidad de un autoabastecimiento térmico.

La ciudad de Xalapa, Veracruz se caracteriza por presentar frecuentemente fenómenos climatológicos de lluvia y de nubosidad, al encontrarse ubicada su zona urbana asociada a un ecosistema del tipo mesófilo de montaña. Por lo tanto, es de vital relevancia considerar que se requerirá de una fuente térmica adicional al recurso solar, lo que podría permitir obtener el calor de proceso en los puntos en el que el recurso solar sea escaso e intermitente, por ejemplo, en días nublados, con lluvias o incluso en los periodos nocturnos.

Conclusiones

Se ha diseñado un evaporador solar para la deshidratación de lactosuero con el fin de facilitar su manipulación (transporte) bajo las condiciones de la ciudad de Xalapa. El prototipo de evaporador busca promover el aprovechamiento del lactosuero para evitar y reducir su gestión como residuo y los impactos negativos al ambiente por contaminación del agua.

Con base en lo encontrado en el presente trabajo, se considera necesario la realización de futuras investigaciones que se enfoquen en el estudio de la operación del prototipo a lo largo del tiempo y que analicen las características de los productos obtenidos del proceso de evaporación.

Adicionalmente, se considera pertinente el desarrollo de futuras versiones del prototipo, por ejemplo, incluir un sistema de suministro paralelo de energía térmica a la fuente solar (donde esta podría convertirse en un sistema auxiliar), lo que podría asegurar la continuidad del proceso de evaporación a lo largo del tiempo (día y noche y en días con nubosidad y lluvia).

Con base en lo analizado durante este trabajo se concluye que, si el evaporador solar se utiliza en la ciudad de Xalapa, Veracruz, México, se tiene que considerar el uso de otro sistema energético como suministro primario de energía (combustibles o electricidad), el cual podría ser una fuente de energía convencional, alternativa o renovable. En resumen, se recomienda la transformación del prototipo a uno del tipo híbrido.

Agradecimientos

A la Red de Eficiencia Térmica Industrial RIETI-CYTED por la oportunidad de intercambiar experiencias sobre energías renovables y aprender de los conocimientos obtenidos en investigaciones realizadas por las instituciones participantes. Ricardo Musule Lagunes agradece como colaborador del proyecto CONAHCYT-PRONACES 319333 relacionado con la aplicación de ecotecnologías. Agradecemos profundamente las revisiones detalladas y las valiosas sugerencias proporcionadas por los dos árbitros y la valiosa retroalimentación del Dr. Gómez Arias, su contribución ha favorecido enormemente al manuscrito.

Referencias

- Abaigar, A. (2003). El lactosuero en la alimentación del ganado porcino. GANADERO, Navarra, España.
- AOACEU. (1990). Official methods of analysis - supplements: Changes in Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemist, Association of Official Analytical Chemists. Chicago.
- Cancino, B., Espina V., y Orellana, C. (2006). Whey concentration using microfiltration and ultrafiltration. *Desalination*, 557-558.
- Cengel, Y. (2009). Termodinámica. 6 a ed. McGrawHill. México.
- Chang, R. (2007). Química. 8 a ed. McGrawHill. México.
- Chegini, G., & Taheri, M. (2013). Whey powder: process technology and physical properties: a review. *Middle-East journal of scientific Research*, 13(10), 1377-1387. [https://idosi.org/mejsr/mejsr13\(10\)13/14.pdf](https://idosi.org/mejsr/mejsr13(10)13/14.pdf)
- Cochachin-Carrera, B., Moreno-Cuevas, J., y Carvajal-Mena, N. (2023). Effects of concentration by block freezing and vacuum evaporation on the physicochemical properties and digestibility of whey. *CyTA-Journal of Food*, 21(1), 313-320.
- Cunningham, A. E. (2000). Optimización de rendimientos de quesería. OEA, Saltillo, Coahuila, México.
- De la Cruz, D.Á. (2018). Potencial de aprovechamiento del suero de queso en México. *Agroproductividad*, 11 (7), 101-106.
- Flores-Mendoza, A. P., Hernández-García, H., Cocotle-Ronzón, Y., & Hernandez-Martinez, E. (2020). Methanogenesis of raw cheese whey: pH and substrate-inoculum ratio evaluation at mesophyll temperature range. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(7), 1946-1952. <https://doi.org/10.1002/jctb.6391>
- Geankoplis. (2007). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 4 a ed. CECSA, México.
- Gómez Alcántara, A., Cervantes Escoto, F., Altamirano Cárdenas, J. R., & Garza López, J. M. (2009). Alternativas a la problemática ocasionada por lactosueros en el Valle de Tulancingo, Hidalgo. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

- Khetni, M. (2018). Design, construction and evaluation of a vacuum evaporation system for the concentration of aqueous whey protein solutions (Disertación doctoral, Stellenbosch: Stellenbosch University).
- Masera, K., Tannous, H., Stojceska, V., y Tassou, S. (2023). An investigation of the recent advances of the integration of solar thermal energy systems to the dairy processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172, 113028.
- Manrique, J. (1984). *Energía Solar Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas*. HARLA, México.
- McCabe, W., y Smith, J. (2007). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. 7ª ed. McGrawHill. México.
- Nadal-Bach, J., Bruno, J. C., Farnos, J., y Rovira, M. (2021). Solar stills and evaporators for the treatment of agro-industrial liquid wastes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110825.
- Najar-Almanzor, C. E., Velasco-Iglesias, K. D., Nunez-Ramos, R., Uribe-Velázquez, T., Solis-Bañuelos, M., Fuentes-Carrasco, O. J., ... y Carrillo-Nieves, D. (2023). Microalgae-assisted green bioremediation of food-processing wastewater: A sustainable approach toward a circular economy concept. *Journal of Environmental Management*, 345, 118774.
- NASA. (2010). Surface meteorology and Solar Energy website, revisado en mayo 14 del 2010 de <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>.
- Ozel, B., McClements, D. J., Arikian, C., Kaner, O., y Oztop, M. H. (2022). Challenges in dried whey powder production: Quality problems. *Food Research International*, 160, 111682. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111682>
- Pandey, A. K., Kumar, R. R., Kalidasan, B., Laghari, I. A., Samykano, M., Kothari, R., ... y Tyagi, V. V. (2021). Utilization of solar energy for wastewater treatment: Challenges and progressive research trends. *Journal of Environmental Management*, 297, 113300.
- Perales, T. (2007). *Guía del instalador de energías renovables*. LIMUSA, México.
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Manual del Ingeniero Químico*. Volumen II. McGrawHill, Madrid, España.
- Petruccioli, M., Raviv, M., Di Silvestro, R., y Dinelli, G. (2019). Agriculture and agro industrial wastes, by-products, and wastewaters: Origin, characteristics, and potential in bio-based compounds production. In: M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology* (3rd ed., pp. 477–490). Elsevier.
- Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S. M. A., y Rahim, N. A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 133-148.
- Quijera J. A., Gonzalez M., y Labidi J. (2010). Integration of a solar thermal system in a dairy process. *Renewable Energy* 36, 1843-1853.
- Requena, A. J., y Gómez O. J.J. (2004). Sistema de control del proceso de evaporación a vacío. *Tec. Alim.* 01-06.
- Serpa L., Rauber F. F., Cichoski A. J., y Di Luccio M. (2005). Assessment of ultrafiltration and vacuum evaporation on whey protein concentration. *EMPROMER*. 01-09.
- SMN. (2011). SMN website, revisado en mayo 19 del 201 <http://smn.cna.gob.mx>.

Souza, R. R., Gimenes, M. L., Costa, S. C., & Müller, C. M. (2008). Eliminación de grasas del suero del queso para obtener proteínas y lactosa. *Inf. Tec.* 19, 41-50. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642008000200006>

Torres-Martínez, Q., y Romero-León, K. (2020). Alternativas tecnológicas para uso del lactosuero: valorización económica de residuos. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 30(55). <https://doi.org/10.24836/es.v30i55.908>

Valencia E., y Ramírez M. (2009). La industria de la leche y la contaminación del agua. *Elem*, 73, 27-31. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=29411996004>

Manuscrito recibido: 29 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 14 de octubre de 2024

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 2024

Pobreza energética en Latinoamérica: Un análisis desde diversas perspectivas

Juan Peralta-Jaramillo, Emérita Delgado-Plaza

ESPOL, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Centro de desarrollo Tecnológico Sostenible CDTs. FIMCP.

Campus Prosperina, Km 30.5 Vía Perimetral

jperal@espol.edu.ec

eadelgad@espol.edu.ec

Resumen

La pobreza energética es un fenómeno que afecta a muchos países de la región de América Latina que está arraigado en factores socioeconómicos, de infraestructura y de acceso a la energía. Es un tema de análisis de vital importancia para asegurar que la población tenga acceso adecuado a recursos energéticos, abarcando mucho más que la distribución de electricidad, como el aislamiento térmico, el confort y el impacto en la salud y el bienestar de la persona. Este artículo se basa en un análisis de recopilación bibliográfica de diversos autores y analiza los impactos de la pobreza energética en la salud, las estrategias y políticas, los subsidios y la asistencia financiera, así como el papel crucial de las fuentes de energía renovables. A través de estas dimensiones claves, se busca una comprensión integral y propuestas efectivas para mitigar la pobreza energética en la región.

Palabras clave: Pobreza energética, acceso a la energía, eficiencia energética, infraestructura

Abstract

Energy poverty is a phenomenon that affects many countries in the Latin American region, rooted in socioeconomic factors, infrastructure, and access to energy. It is a critically important topic to analyze to ensure that the population has adequate access to energy resources, encompassing much more than just electricity distribution. It includes thermal insulation, comfort, and its impact on health and well-being. This article is based on a bibliographic analysis from various authors, examining the impacts of energy poverty on health, strategies and policies, subsidies, and financial assistance, as well as the crucial role of renewable energy sources. Through these key dimensions, the aim is to achieve a comprehensive understanding and effective proposals to mitigate energy poverty in the region.

Key words: Energy poverty, Energy Access, Energy efficiency, Infrastructure

Introducción

La pobreza energética es un fenómeno complejo y multidimensional que afecta a millones de personas en todo el mundo, especialmente en las regiones más vulnerables, como Latinoamérica. Este problema está estrechamente relacionado con factores socioeconómicos, condiciones de la vivienda y acceso limitado a fuentes de energía asequibles y confiables, (Shonali, 2011; Mohsin *et al.*, 2022). Por otra parte, según en el estudio publicado por González e Ibañez-Martín (2023), presentan un análisis del proceso de convergencia en términos de indicadores de pobreza energética en América Latina durante aproximadamente las últimas seis décadas, incluyendo acceso, calidad y asequibilidad de la energía. El enfoque es buscar alternativas para promover la adopción de las energías renovables, reducir los retrasos en la obtención de una conexión eléctrica y recortar los subsidios al gas natural y al petróleo. El uso de energías renovables no es una solución a corto plazo porque se requiere de estudios técnicos que garanticen la factibilidad continua de la generación eléctrica con fuentes de energías renovables para una región (Gu, 2024; Menyhért, 2024).

Los países con niveles menores de desarrollo económico son los más afectados por las limitaciones de acceso debido a la falta de infraestructura energética moderna. Por ello la región enfrenta desafíos relacionados con el acceso limitado a electricidad en zonas rurales, altos costos de energía y dependencia de combustibles contaminantes, y aún se continúa utilizando leña en las zonas más vulnerables, a lo que se suman la falta de acceso por carreteras para la distribución del GLP (gas licuado del petróleo). Según (Guzowski, 2021) la pobreza energética en la región está asociada con bajos ingresos, infraestructura deficiente y una alta dependencia de fuentes energéticas contaminantes y no sostenibles, por lo cual es importante, que los gobernantes establezcan políticas de transición energética que beneficie

a los pueblos y además concilie la necesidad de abordar la pobreza energética y aborde la mitigación del cambio climático, la sostenibilidad energética, el empleo digno, la inclusión social e involucre salud, confort y bienestar.

Definiciones y enfoques conceptuales de la pobreza energética

La pobreza energética ha sido definida y conceptualizada de diversas maneras en la literatura. (Bouzarovski y Petrova, 2015) la definen como “la incapacidad de un hogar para alcanzar un nivel de servicio energético adecuado”, lo que implica que las familias no pueden hacer uso de los servicios energéticos necesarios para mantener un nivel de vida digno.

Guzowski *et al.* (2021) definen pobreza energética como la falta de acceso a servicios energéticos modernos, lo que genera exclusión social y limita el desarrollo de capacidades individuales y sociales. Por su parte, Shonali Pachauri (2011) señala que la pobreza energética está relacionada con la incapacidad de acceder a fuentes de energía modernas y confiables, lo que incrementa la vulnerabilidad de las poblaciones de bajos recursos y limita sus oportunidades de desarrollo. Esto es particularmente relevante en el contexto latinoamericano, donde el acceso a la energía aún presenta importantes desafíos a nivel de distribución, calidad y precios (Soriano-Hernández *et al.*, 2022; Mohsin *et al.*, 2022).

Thomson (2013) enfatiza que la pobreza energética va más allá de la mera falta de acceso a la energía, y que implica impactos o externalidades negativas en la salud, el estrés y el aislamiento social. Estos efectos adversos han sido documentados en diversos estudios sobre la pobreza energética en la región (Marmolejo Cervantes y Solís Reilly, 2024; Pérez Gelves *et al.*, 2023).

Dubois y Meier (2016) proponen un enfoque multidimensional para medir la pobreza

energética, considerando variables como ingresos, gastos energéticos y eficiencia de los hogares. Este tipo de aproximaciones permite identificar de manera más precisa a las poblaciones vulnerables y comprender la complejidad del fenómeno en Latinoamérica.

Finalmente, Boardman (2009) señala que la pobreza energética está determinada por una combinación de bajos ingresos, altos costos energéticos y viviendas ineficientes. Esta definición resalta la importancia de abordar tanto los aspectos económicos como las condiciones físicas de la vivienda para lograr una comprensión integral del problema, lo cual es fundamental en un contexto de desigualdad y precariedad como el de Latinoamérica.

Factores de la pobreza energética en Latinoamérica

Varios investigadores han identificado diversos factores que contribuyen a la pobreza energética en Latinoamérica, los cuales se pueden agrupar en tres categorías principales: factores socioeconómicos, infraestructura y acceso a la energía.

Factores socioeconómicos: Los bajos ingresos y el desempleo son reconocidos como los principales determinantes de la pobreza energética en la región (Mohsin *et al.*, 2022; Shonali Pachauri, 2011; Boardman, 2009). Asimismo, los altos costos energéticos en relación con los ingresos de los hogares son un factor clave que contribuye a este fenómeno (Marmolejo Cervantes y Solís Reilly, 2024; Boardman, 2009).

Infraestructura: Las condiciones de la vivienda, la calidad y eficiencia energética de las viviendas que permitan condiciones de confort térmico en los hogares también son determinantes importantes de la pobreza energética en Latinoamérica. Las viviendas con problemas de aislamiento y sistemas de calefacción ineficientes generan altos consumos energéticos y mayores costos

por temas de climatización que los hogares de bajos ingresos no pueden asumir (Bouzarovski y Petrova, 2015; Thomson, 2013; Clavijo-Núñez *et al.*, 2024; Guzowski *et al.*, 2021) (Burguillo *et al.*, 2024)

Acceso a la energía: El acceso limitado a fuentes de energía asequibles y confiables es otro factor determinante de la pobreza energética en la región. Las poblaciones de bajos recursos a menudo dependen de fuentes de energía tradicionales, como la leña o el carbón, lo que incrementa los riesgos para la salud y el medioambiente (Shonali Pachauri, 2011; Soriano-Hernández *et al.*, 2022; Boardman, 2009).

En la Figura 1 se presentan los factores principales de la pobreza energética en Latinoamérica. En el primer cuadro, los bajos ingresos y el desempleo conducen a altos costos energéticos para los hogares. En el segundo cuadro, la calidad deficiente de la vivienda, incluido el aislamiento inadecuado y sistemas de calefacción ineficientes, contribuyen a mayores consumos energéticos y costos de climatización. Por último, el acceso limitado a fuentes de energía asequibles y confiables, junto con la dependencia de fuentes tradicionales, aumenta los riesgos para la salud y ambiente.

Impactos de la pobreza energética en la salud y el bienestar en Latinoamérica

La pobreza energética tiene consecuencias adversas en diversos ámbitos de la vida de los hogares afectados en Latinoamérica, especialmente en lo que respecta a la salud y el bienestar. Por ejemplo, la falta de confort térmico en un hogar durante los meses fríos puede tener un impacto negativo en la salud física y mental de los miembros del hogar, generando problemas respiratorios, cardiovasculares y de salud mental, como estrés y ansiedad (Thomson, 2013; Marmolejo Cervantes y Solís Reilly, 2024). Por otra parte, Guzowski *et al.* (2021) establecen que las enfermedades respiratorias y cardiovasculares



Figura 1. Factores principales de la pobreza energética

se deben a la exposición a combustibles sólidos y condiciones inadecuadas en el hogar por la falta de electricidad especialmente en zonas rurales, dejando un claro ejemplo cuando en 2012, la dependencia en la biomasa para cocinar provocó 4.3 millones de muertes prematuras debido a la contaminación del aire interior.

Pérez *et al.* (2023) también citan que la pobreza energética puede generar aislamiento social y dificultades para participar en actividades comunitarias, lo que afecta el bienestar psicológico y la calidad de vida de las personas en la región. Esto se debe a que los hogares en situación de pobreza energética suelen priorizar el gasto en energía en detrimento de otras necesidades, como la alimentación, salud, educación o recreación.

Boardman (2009) y Hartinger *et al.* (2024) enfatizan que los impactos de la pobreza energética no se limitan a los individuos, sino que también tienen repercusiones a nivel de la sociedad. Por ejemplo, los problemas de salud asociados a esta problemática pueden generar mayores costos para los sistemas de salud pública y una pérdida de productividad laboral.

Estrategias y políticas para abordar la pobreza energética en Latinoamérica

La literatura científica ha propuesto una variedad de estrategias y políticas para abordar la pobreza energética en el contexto latinoamericano, pero en la práctica se centran en estrategias de eficiencia energética, apoyos económicos y promoción de energías renovables (Hwang y Díez, 2024; Zou *et al.*, 2023)

Mejora de la eficiencia energética de las viviendas. Boardman (2009; Thomson, 2013; Velasco *et al.*, 2024) señalan que las políticas de eficiencia energética, como la implementación de aislamiento térmico y sistemas de calefacción eficientes, pueden contribuir a reducir los costos energéticos de los hogares y mejorar su bienestar en la región. Por otra parte Guzowski (Guzowski, Martin, & Zabaloy, 2021), señala dentro de estrategias y políticas la necesidad de una transición energética justa, que tenga en cuenta las necesidades de los sectores más pobres al mismo tiempo que se mitigan los efectos del cambio climático.

Subsidios y asistencia financiera. Boardman (2009) Dubois y Meier (2016) y Mohsin *et al.*,

(2022) destacan que los subsidios a la energía y los programas de asistencia financiera pueden ser herramientas efectivas para aliviar la carga económica de los hogares en situación de pobreza energética en Latinoamérica.

Promoción de fuentes de energía renovables y asequibles. Shonali Pachauri (2011), Bouzarovski y Petrova, 2015) y Hwang y Díez (2024) enfatizan en la importancia de promover el acceso a fuentes de energía renovables y asequibles, así como el desarrollo de infraestructura energética moderna y confiable, especialmente en áreas rurales y remotas de Latinoamérica bajo el esquema de desarrollo sostenible, empleando la educación como un proceso clave para lograr esta meta.

El diagrama de la Figura 2, representa la intersección de tres dimensiones clave en la mitigación de la pobreza energética en América Latina: eficiencia energética, subsidios y asistencia financiera y promoción de energías renovables. Este enfoque integrado resalta la necesidad de políticas que combinen medidas de mejora de la eficiencia en el consumo de energía con apoyos económicos específicos y la transición hacia fuentes renovables. La sinergia

entre estas dimensiones implica un abordaje interdependiente y estratégico para promover soluciones sostenibles y equitativas en la región, reflejando un consenso académico sobre la complejidad de la pobreza energética y la necesidad de enfoques multidimensionales para lograr soluciones.

Por otra parte, varios autores describen que el desarrollo de enfoques integrales y multidimensionales y las políticas locales y regionales deben considerar tanto los aspectos económicos como las condiciones físicas de las viviendas y el acceso a fuentes de energía asequibles, con el objetivo de lograr soluciones sostenibles y duraderas en el contexto latinoamericano (Thomson , 2013; Dubois y Meier, 2016; Hartinger *et al.*, 2024). Entre algunos ejemplos en la literatura tenemos:

a) Koster et al. (2024) analizaron la pobreza energética en México, utilizando un enfoque multidimensional que considera variables como ingresos, eficiencia energética de la vivienda y acceso a servicios energéticos. Los autores destacan la necesidad de políticas integrales que aborden los determinantes clave de este fenómeno.



Figura 3. Dimensiones clave en la mitigación de la pobreza energética.

b) Marmolejo-Solis (2024) evaluaron el impacto de la pobreza energética en la justicia social en México, enfatizando la importancia de un enfoque basado en derechos humanos para abordar ese desafío.

c) Hwang y Díez (2024) utilizaron mapas de potencial solar para identificar áreas con alto potencial de energía renovable que podrían contribuir a mitigar la pobreza energética en América Latina.

d) Moshin *et al.* (2022) estudiaron la relación entre el desarrollo financiero y la pobreza energética en América Latina, encontrando que una mayor inclusión financiera puede contribuir a abordar este problema.

En definitiva, la pobreza energética, una problemática compleja y multidimensional, ha sido objeto de análisis en diversos contextos geográficos y facetas de la región. Estos estudios abordan aspectos clave de la pobreza energética, desde su evaluación multidimensional hasta su impacto en la justicia social, la identificación de áreas con potencial para energías renovables y la relación entre desarrollo financiero y acceso a la energía. Esta diversidad de enfoques y perspectivas ofrece una visión integral de la pobreza energética y resalta la necesidad de políticas y acciones coordinadas para la construcción de soluciones sostenibles (Bouzarovski y Petrova, 2015)

Educación en Ambientes en línea y Pobreza Energética

La pobreza energética impone restricciones sobre la accesibilidad y calidad de los recursos educativos, limitando la capacidad de los estudiantes para participar en experiencias de aprendizaje prácticas (Sun *et al.*, 2023) En este contexto, la implementación de laboratorios en línea puede ser una solución técnica eficaz. Estos laboratorios virtuales y/o remotos permiten la ejecución de experimentos y simulaciones a

través de plataformas digitales, eliminando la necesidad de infraestructura física costosa y de un suministro energético. Esta modalidad de aprendizaje contribuye a la inclusión educativa al ofrecer acceso a prácticas científicas avanzadas, independientemente de las restricciones energéticas locales. Complementariamente, los contenidos en línea juegan un papel crucial en la reducción de la brecha educativa en contextos de pobreza energética. Las plataformas de aprendizaje digital permiten la distribución de materiales educativos adaptados a los recursos tecnológicos disponibles, optimizando el consumo de datos y energía. La utilización de contenidos educativos accesibles y de bajo consumo energético permite a los estudiantes acceder a la formación técnica y científica de alta calidad, sin los impedimentos asociados con la falta de infraestructura física. Esta estrategia no solo amplía el acceso a la educación, sino que también fortalece la equidad educativa al proporcionar recursos y oportunidades de aprendizaje a estudiantes en regiones con desafíos energéticos significativos.

Es evidente que los laboratorios remotos han cobrado relevancia en la educación técnica y científica al permitir la ejecución de experimentos y prácticas a distancia, proporcionando acceso a equipos y tecnología avanzada sin restricciones geográficas. Esta modalidad no solo amplía las oportunidades de aprendizaje práctico, sino que también fomenta la colaboración entre instituciones y la innovación en la enseñanza. En este contexto, el proyecto EU-BEGP “Modernising Digital Education in Energy Transition for Circular Economy in Latin America”, tiene como objetivo modernizar la educación digital en el sector energético en América Latina, involucrando a nueve universidades de la región y dos de Europa. Se desarrollarán programas educativos adaptados a las condiciones locales, incluyendo programas de postgrados y formación continua con la meta de capacitar a más de 1,000 estudiantes. Además, se implementarán diez laboratorios remotos que permitirán

a los estudiantes en áreas remotas realizar experimentos prácticos. Además, de desarrollar recursos en colaboración con industrias locales, mejorando así la empleabilidad de los jóvenes profesionales. El proyecto se basa en un proceso de mejora de calidad que incluye revisiones por pares, asegurando la alta calidad de los recursos educativos desarrollados (Villazón, 2024)

Actualmente, se están desarrollando laboratorios remotos como parte de la modernización de la educación digital en la transición energética hacia una economía circular en América Latina. Estos laboratorios facilitan la implementación de metodologías de aprendizaje activo y colaborativo, mejorando la calidad educativa y promoviendo la investigación aplicada. A través de la integración de tecnologías y simulación, los laboratorios remotos del proyecto EU-BEGP buscan no solo fortalecer las competencias técnicas de los estudiantes, sino también crear un ecosistema educativo interconectado y sostenible que responda a las demandas de la transición energética en la región

El proyecto EU-BEGP se presenta como una iniciativa clave para abordar estos desafíos. Al enfocarse en la modernización de la educación digital en el sector energético en América Latina, el proyecto busca desarrollar cursos y programas que se adapten a las condiciones locales,

facilitando el acceso a una educación de calidad. La colaboración entre universidades de la región y de Europa permitirá la creación de laboratorios remotos y la implementación de contenidos educativos accesibles, lo que no solo beneficiará a los estudiantes en términos de formación técnica y científica, sino que también contribuirá a cerrar la brecha educativa provocada por la pobreza energética.

En definitiva, proyectos asociados a transformar los ambientes de aprendizaje se alinean directamente con la necesidad de promover un aprendizaje inclusivo y equitativo, empoderando a los estudiantes para enfrentar los retos del sector energético en un contexto de sostenibilidad.

Conclusiones

La presente revisión de la literatura evidencia que la pobreza energética es un problema complejo que requiere de soluciones integrales y sostenibles en Latinoamérica. Los diversos enfoques conceptuales analizados coinciden en que este fenómeno va más allá de la mera falta de acceso a la energía, e implica una combinación de factores socioeconómicos, de eficiencia energética y de calidad de la vivienda que limitan la capacidad de los hogares para satisfacer sus necesidades energéticas básicas.

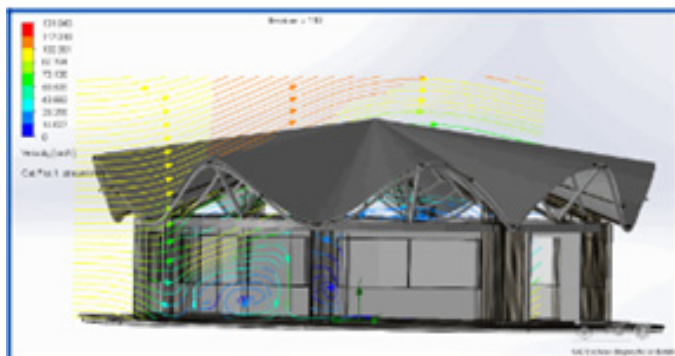


Figura 3. Desarrollo de laboratorios remotos por parte de la instituciones participantes proyecto EU-BEGP

Los principales determinantes de la pobreza energética en la región son los bajos ingresos y el desempleo, las condiciones deficientes de las viviendas, y el acceso limitado a fuentes de energía asequibles y confiables. Estos factores interactúan de manera compleja y perpetúan el ciclo de vulnerabilidad y exclusión social que afecta a muchos en Latinoamérica.

Asimismo, la revisión destaca los impactos adversos de la pobreza energética en la salud y el bienestar de los hogares afectados, con repercusiones a nivel individual, familiar y social. Estos efectos negativos son particularmente relevantes en un contexto de desigualdad y precariedad como el de la región, donde los sistemas de salud y protección social enfrentan importantes desafíos.

En cuanto a las estrategias y políticas propuestas, la literatura científica resalta la importancia de la mejora de la eficiencia energética de las viviendas, la implementación de subsidios y asistencia financiera, la promoción de fuentes de energía renovables y asequibles, y la adopción de enfoques integrales y multidimensionales.

Finalmente, hay que considerar el papel fundamental de la educación en la mitigación de la pobreza energética en Latinoamérica. La promoción de la educación en el marco del desarrollo sostenible y la conciencia sobre prácticas de eficiencia energética, así como el acceso a información sobre opciones de energías renovables y programas de apoyo financiero, pueden empoderar a las comunidades para tomar medidas proactivas y sostenibles hacia la mejora de sus condiciones y calidad de vida.

Agradecimientos

A la red RIETI-CYTED justamente por permitirnos compartir experiencias en el campo de la eficiencia energética y enriquecernos con los conocimientos aportados por los estudios desarrollados en las instituciones integrantes de la RED.

A EUROPEAN EDUCATION AND CULTURE EXECUTIVE AGENCY (EACEA) y Programme (ERASMUS +), por el financiamiento al Project 101081473 - EU-BEGP “Modernising Digital Education in Energy Transition for Circular Economy in Latin America”

Nota: Este trabajo fue arbitrado por Esmeralda Cervantes R.

Referencias

- Boardman, B. (2009). Fixing Fuel Poverty: Challenges and Solutions. Earthscan (1ª Edición ed.). Londres. doi:<https://doi.org/10.4324/9781849774482>
- Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). “A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. Energy Research & Social Science, 10, 31-40. doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007>
- urguillo, M., del Río, P., & Juez-Martel, P. (2024). Does energy poverty influence decarbonisation through electrification of the heating Sector? Energy and Buildings, 312, 114110. doi:[10.1016/j.enbuild.2024.114110](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114110)
- Clavijo-Núñez, Susana, N.-C.-L. (2024). The importance of citizen participation in improving comfort and and health in obsolete neighbourhoods affected by energy poverty. Energy Policy, Elsevier, 194. doi:[DOI: 10.1016/j.enpol.2024.114177](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114177)
- González, F., & Ibáñez-Martín, M. (2023). Six Decades of Energy Poverty: Reducing Disparities in Latin America and the Caribbean? INVI., 38(109), 71-99. doi:<https://doi.org/10.5354/0718-8358.2023.70125>.

- Gu, J. (2024). Dynamic bidirectional relationship between financial inclusion and energy poverty: Evidence from China. *Energy Reports*, 11, 5300–5314. doi:10.1016/j.egy.2024.05.004
- Guzowski, C. M. (2021). Energy poverty: conceptualization and its link to exclusion. Brief review for Latin America. *Ambiente & Sociedade*. doi:https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200027r2vu2021l2de.
- Hartinger, S. M., Palmeiro-Silva, Y. K., Llerena-Cayo, C., Blanco-Villafuerte, L., Escobar, L. E., Díaz, A., . . . Romanello, M. (2024). The 2023 Latin America report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for health-centred climate-resilient development. *The Lancet Regional Health - Americas*, 33, 100746. doi:10.1016/j.lana.2024.100746
- Koster, G., van Sark, W., & Ricker, B. (2024). Solar potential for social benefit: Maps to sustainably address energy poverty utilizing open spatial data in data poor settings. *Energy for Sustainable Development*, 80, 101453. doi:10.1016/j.esd.2024.101453
- Marmolejo Cervantes, M., & Solís Reilly, L. (2024). Energy poverty and social justice in Mexico: The rights of electricity consumers. *The Electricity Journal*, 37(2), 107174. doi:10.1016/j.tej.2024.107372
- Menyhért, B. (2024). Energy poverty in the European Union. The art of kaleidoscopic measurement. *Energy Policy*, 190. doi:10.1016/j.enpol.2024.114160
- Mohsin, M., Taghizadeh-Hesary, F., & Shahbaz, M. (2022). Nexus between financial development and energy poverty in Latin America. *Energy Policy*, 165, 112925. doi:10.1016/j.enpol.2022.112925
- Pérez Gelves, J. J., Østergaard, P. A., & Díaz Flórez, G. A. (2023). Energy poverty assessment and the impact of Covid-19: An empirical analysis of Colombia. *Energy Policy*, 181. doi:10.1016/j.enpol.2023.113716
- Shonali Pachauri, D. S. (2011). Measuring and monitoring energy poverty. *Energy Policy*, 39(12), 7497-7504.
- Soriano-Hernández, P., Mejía-Montero, A., & van der Horst, D. (2022). Characterisation of energy poverty in Mexico using energy justice and econophysics. *Energy for Sustainable Development*, 71, 200–211. doi:10.1016/j.esd.2022.09.005
- Sun, C., Khan, A., & Ren, Y. (2023). Empowering Progress: Education, innovations and financial development in the battle against energy poverty. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138941. doi:10.1016/j.jclepro.2023.138941
- Thomson, H. a. (2013). Quantifying the prevalence of fuel poverty across the European Union. *Energy Policy*, 52, 563-572.
- U. Dubois and H.Meier. (2016). “Energy affordability and energy inequality in Europe: Implications for policymaking. *Energy Research & Social Science*, 18, 21-35. doi:https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.04.015.
- Villazón, A. (2024). Modernizing collaborative digital education in emerging regions with active learning methodologies. *IEEE World Engineering Education Conference (EDUNINE)*. doi:IEEE. https://doi.org/10.1109/EDUNINE60625.2024.10500623

Young Kyu, H. Y. (2024). Renewable energy transition and green growth nexus in Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 198, 114431. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114431>

Zou, R., Yang, J., & Feng, C. (2023). Does informatization alleviate energy poverty? A global perspective. *Energy Economics*, 126, 106971. doi:[10.1016/j.eneco.2023.106971](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106971)

Manuscrito recibido: 9 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 10 de octubre de 2024

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 2024

Modelos cinéticos de secado en biomasa con corriente de aire

Ignacio Gándia¹, Isabel López Cortes¹, Borja Velázquez Martí^{2*}

¹Departamento de Producción Vegetal, Universitat Politècnica de Valencia,
Camino de Vera s/n 46022 Valencia (España)

²Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de Valencia,
Camino de Vera s/n 46022 Valencia (España)

*borvemar@dmta.upv.es

Resumen

En el ámbito del secado convectivo, se han propuesto diversos modelos por distintos grupos de investigación, tanto teóricos como empíricos. Sin embargo, la investigación en modelos matemáticos teóricos han sido pocos estudiados y los modelos empíricos actuales presentan dificultades en su implantación en otras investigaciones. Esto sugiere enfocar nuevas investigaciones en la obtención de modelos adaptables a diferentes especies y condiciones ambientales. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue analizar el estado actual de la investigación en el proceso de secado y transferencia de masa, donde se concluye que el secado es un proceso matemáticamente complejo que debe modelarse en dos etapas: etapa de velocidad de secado constante y etapa de velocidad de secado decreciente. La modelización de la fase de secado constante se puede basar en la ecuación de transferencia de masa por convección, aunque las predicciones del coeficiente con analogías a la transferencia de calor no son precisas y presenta no desviaciones cuando son aplicados a procesos de secado de biomasa. La modelización de la fase de secado con velocidad variable debe centrarse en la variación de la difusividad del agua en los materiales porosos o la permeabilidad del vapor en función de la humedad y temperatura del material. Por lo que se requiere generar una base de datos de ecuaciones homogeneizadas particularizadas para cada material para predecir velocidades y tiempos de secado en condiciones de convección predeterminadas. Esto representa un desafío científico y sugiere que la investigación en cinética de secado aún necesita desarrollo.

Palabras clave: cinética de secado, tiempo de secado, biomasa, bioenergía, tratamiento biomasa, biocombustibles.

Abstract

In the area of convective drying, numerous models have been proposed by various research teams, encompassing both theoretical and empirical approaches. However, the exploration of theoretical mathematical models has been limited and requires further development. Empirical models face challenges when applied to other studies. It is recommended that future research focus on creating models that can be adapted to different species and environmental conditions. This study aimed to assess the current state of research in the drying and mass transfer process. It was found that drying is a mathematically intricate process that needs to be modeled with differential equations in two distinct stages: a constant drying rate stage and a decreasing drying rate stage. The modeling of the constant drying phase can utilize the convective mass transfer equation, although predicting the coefficient using heat transfer analogies shows discrepancies with biomass. The modeling of the variable drying rate phase should concentrate on the changes in water diffusivity in porous materials or vapor permeability based on the material's humidity and temperature. A comprehensive database of homogenized equations tailored to each material is necessary to accurately predict drying rates and times under specific convection conditions. This presents a scientific challenge and indicates that further research in drying kinetics is still needed.

Key words: drying kinetics, drying time, biomass, bioenergy, biomass treatment, biofuels.

Introducción

El secado es un proceso consistente en eliminar la humedad de un material hasta un nivel deseado. Éste es comúnmente utilizado en la producción de biocombustibles sólidos. Sin embargo, a pesar de que es un proceso frecuente, su modelación matemática para la predicción de energía y tiempo empleado en el proceso no ha sido completamente desarrollada debido a la dependencia de múltiples factores y variantes del proceso (Kudra y Mujumdar, 2009; Mujumdar, 2007; Chávez *et al.*, 2021). La porosidad y la estructura química de la biomasa hace que las partículas de agua que contiene estén sometidas a capilaridad, y fuerzas electrostáticas, como puentes de hidrógeno fuerzas de van der Waals. La variabilidad de las estructuras biomásicas hace que no se puedan dar valores generales a los parámetros que tienen los modelos matemáticos de predicción de velocidad de secado de la biomasa. En este capítulo se pretende realizar una revisión de las propuestas que han realizado distintos investigadores, proponiendo un procedimiento estandarizado de evaluación que se ajuste lo más posible a la realidad física.

Generalmente, antes de iniciar el proceso de secado para la producción de biocombustibles sólidos, se suele preparar el material mediante una trituración o molienda. La trituración es la fragmentación del material hasta un tamaño de partículas de pocos centímetros (3 a 5 cm). La molienda es la reducción del tamaño de partícula a menos de 3 mm. Tras la reducción de tamaño, el material puede ser combustionado directamente o ser transformado en otros biocombustibles. Los materiales triturados pueden ser transformados a carbón vegetal. El material molido puede ser usado para la fabricación de pellets o briquetas. Aunque probablemente existen experimentos de secado de partículas pequeñas, lo habitual es realizar secado en material astillado o triturado, con tamaño de partícula mayor a 3 cm. Obviamente el tamaño de partícula pequeño

aumenta la superficie de transferencia de masa, pero el manejo de esas partículas es más dificultoso.

Tras la reducción del tamaño de partícula, hay varios métodos de secado disponibles: Los métodos comunes incluyen:

- Secado por aire: Es el método más comúnmente utilizado; implica el uso de aire para evaporar la humedad del material. La corriente de aire puede ser forzada o natural. EL aire absorbe las partículas de agua por difusión y convección (Sychevskii, 2018; Saha, 2006).

- Secado al vacío: Se utiliza una presión negativa reducida sobre la superficie para acelerar el proceso de evaporación. Esta presión influye en la difusión de partículas en el interior de los poros de la biomasa y por tanto aumenta la velocidad de transferencia de masa.

- Secado por radiación: En este proceso, la energía radiante es absorbida por el material, lo que provoca la evaporación del agua. La radiación electromagnética puede provenir de diversas fuentes, como radiadores eléctricos, lámparas infrarrojas, microondas u otras fuentes de energía radiante. Cuando la radiación alcanza el material húmedo, parte de la energía se absorbe y se convierte en calor. Este calor provoca la evaporación del agua, permitiendo que escape del material en forma de vapor. El secado por radiación puede ser selectivo, ya que los diferentes materiales tienen diferentes capacidades de absorción, lo que afecta la velocidad y eficiencia del proceso de secado. Por ejemplo, el material puede comportarse transparente a las microondas que interaccionarán exclusivamente sobre las moléculas de agua, donde se genera el calor de evaporación.

- Secado por liofilización: Implica congelar el material y luego eliminar el agua mediante sublimación en condiciones de vacío.

La duración del proceso varía según el método utilizado, el tipo de material, porosidad y el nivel de humedad requerido. Durante el proceso de secado, es importante controlar varios parámetros como tamaño de partícula, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire, y la presión de vacío en su caso. Es importante destacar que el proceso de secado puede ser crítico en el balance de energía en la producción de biocombustibles. La eficiencia energética es una consideración importante durante el diseño e implementación de sistemas de secado industriales (Siau, 1995). Es por ello, por lo que la modelización matemática para la predicción del tiempo y calidad del proceso se convierte en un reto científico que es necesario trabajar.

Por otro lado, el secado es también un proceso muy utilizado en la industria agroalimentaria y farmacéutica (por ejemplo, el secado de alimentos o maderas), por lo que su conocimiento en profundidad se torna necesario para poder optimizarlo.

Así, las dificultades técnicas de la modelización predictiva de los procesos de secado han llevado a desarrollar curvas empíricas que, si bien permiten obtener con relativa sencillez los resultados del proceso (Mills, 1995; Baroni y Hubinger, 1998; Tremblay *et al.*, 2000), sólo permiten su aplicación en las condiciones dadas en el momento y lugar de la experimentación, no pudiendo así transportarse dicho proceso a otras condiciones y obtener los mismos resultados.

$$\dot{m}_w = D_w \cdot \rho_{aire} \frac{(\omega_{sat} - \omega_{aire})}{L_c} \quad (1)$$

$$\dot{m}_w = h_m \cdot \rho_{aire} \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire}) \quad (2)$$

$$\dot{m}_w = K \cdot (x - x_e) \quad (3)$$

Por otra parte, un grupo significativo de investigadores han tratado de modelizar el secado a partir de los fenómenos de transferencia

de masa. Con respecto a ello, se encuentran dos tendencias en el acervo científico, por un lado, los que modelizan el secado a partir de la difusividad por la Ley de Fick (ecuación 1), y la convección de masa (ecuación 2); por otro lado, los que consideran un modelo simplificado de transferencia de masa donde la velocidad de secado es proporcional a la diferencia entre la humedad del material en cada instante y la humedad del material en equilibrio (ecuación 3) ((Dj. Dedic, 2002; Jalili *et al.*, 2013; Khamtree *et al.*, 2020; Koukouch *et al.*, 2020; Kuznetsov *et al.*, 2021).

donde $\dot{m}_w$ es el caudal másico de partículas de agua en el proceso de secado (g agua m⁻² s⁻¹), D_w es la difusividad de masa (m² s⁻¹), ρ_{aire} es la densidad del aire a la temperatura media del proceso, ω_{sat} la humedad del aire saturado en la superficie del material, ω_{aire} la humedad absoluta del aire, L es la distancia donde se produce la diferencia de humedad en el aire, h_m es el coeficiente de transferencia de masa por convección (m s⁻¹), K es la resistencia global de transferencia de masa (g sólido m⁻² s⁻¹), x es la humedad del material en un determinado instante y x_e es la humedad del material en el equilibrio.

Sin embargo, estos modelos no funcionan con precisión debido a una serie de factores influyentes, como la porosidad de los materiales, distribución de tamaño de poro, capilaridad y fuerzas electroestáticas. Estos factores hacen que la difusividad dentro del material no sea constante, y por ende, tampoco lo sea la transferencia en la interfase sólido aire (Chandra y Taludkar, 2010).

Diversos modelos de transferencia de masa intentan predecir el valor de h_m a partir del número de Sherwood, el cual a su vez depende del número de Reynolds y del número de Smith siguiendo correlaciones análogas a las que se utilizan el modelo de transferencia de calor, dónde se sustituye el número de Nusselt por el

número de Sherwood, y el número de Prandtl por el número de Smith. Sin embargo, una de las limitaciones más importantes de estos modelos es que estos números dependen principalmente de las propiedades del flujo de aire utilizado en el proceso de secado, pero también dependen de la difusividad, la cual en la mayoría de los materiales no está bien determinada, puesto que no es constante sino variable con la humedad para una determinada estructura porosa (Rémond y Almeida, 2011; Tarmian *et al.*, 2012). Esto supone un reto científico no abordado todavía con suficiente profundidad. Un estudio interesante para la determinación de esta variabilidad de la difusividad es el presentado por Haya *et al.* (2024). Los cuales presentan un prototipo patentado para esta finalidad.

En la Tabla 1 se muestra un conjunto de trabajos que reportan la variabilidad de la difusividad con la humedad. Sin embargo, no proporcionan ecuaciones sino gráficas para su determinación.

Tabla 1. Trabajos que reportan la variabilidad de la difusividad con la humedad.

Mass diffusivity of low-density fibreboard determined under steady- and unsteady-state conditions: Evidence of dual-scale mechanisms in the diffusion	(Rémond y Almeida, 2011)
Moisture diffusion coefficient of reaction woods: compression wood of <i>Picea abies</i> L. and tension wood of <i>Fagus sylvatica</i> L.	(Tarmian <i>et al.</i> , 2012)
Characterization of sorption behavior and mass transfer properties of four central africa tropical woods: Ayous, Sapele, Frake, Lotofa	(Simo-Tagne <i>et al.</i> , 2016)
Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying	(Tremblay <i>et al.</i> , 2000)
Modification of mass transfer properties in poplar wood (<i>P. robusta</i>) by a thermal treatment at high temperature	(Rousset <i>et al.</i> , 2004)

Comparison of moisture diffusion coefficients for pine, oak and linden wood	(Perkowski <i>et al.</i> , 2017)
---	----------------------------------

Un aspecto clave en la modelización del proceso de secado es el valor del número de Biot en la transferencia de masa (ecuación 4). Este número relaciona la velocidad de transferencia de masa por difusión dentro del material y la transferencia de masa por convección en la superficie.

$$Biot = \frac{h_m \cdot L_c}{D_w} \quad (4)$$

Un número de biot grande indicaría que la velocidad de transferencia de agua en la superficie es significativamente mayor que la movilidad del agua por el material. Esto provocaría la aparición de gradientes de humedad. Las capas de material más superficiales tendrían una humedad menor que las capas más profundas. El número de biot elevado va asociado a un alto coeficiente de transferencia de masa por convección junto una longitud característica grande. Un número de biot pequeño implica una alta difusividad del agua por el material, asociado a un coeficiente de transferencia de masa por convección y tamaños de partículas reducidos. Entonces la variación de humedad en el proceso de secado puede considerarse homogénea sin la aparición de gradientes.

La aparición o no de gradientes de humedad en los materiales durante el proceso de secado dificulta muchísimo la modelización. Por otra parte, no existe un acuerdo generalizado del valor del número de biot a partir del cual se deberían utilizar modelos que consideren estos gradientes, o modelos que consideren la humedad uniforme durante el proceso.

Un gran problema de los modelos de transferencia de masa es que están influenciados por la temperatura a la que se produce el proceso y por el consumo de calor latente en el cambio de estado. Por tanto, se deben desarrollar modelos con estas consideraciones.

El objetivo de este trabajo ha sido analizar el estado actual de las investigaciones publicadas sobre el proceso de secado y transferencia de masa.

Proceso de secado con aire

Para conocer a profundidad como se encuentra en estos momentos la investigación referente al secado de madera, primero es necesario comprender el proceso. El secado es en realidad una transferencia de masa, esto es el intercambio de masa entre dos sistemas debido a dos procesos, la difusión en el interior del material y la convección en la superficie (Faghri *et al.*, 2010). La difusión es el resultado del movimiento aleatorio de moléculas a nivel microscópico y se produce por la diferencia de concentración de agua, provocando un movimiento de dichas partículas desde zonas de alta concentración a zonas de baja concentración (Çencel y Ghajar, 2011). En la convección, al movimiento de moléculas a nivel microscópico hay que sumarle el movimiento masivo a nivel macroscópico del agua, debido a la acción de un fluido en movimiento sobre la superficie de una masa (Faghri *et al.*, 2010; Çencel y Ghajar, 2011).

En el caso del secado con aire caliente con movimiento forzado, donde una corriente de aire aporta el calor superficialmente para la evaporación y arrastra posteriormente las partículas desprendidas, la difusión en la superficie podría calificarse como un proceso menor, debido a que el intercambio de masa que esta produce es tan bajo que se torna despreciable, dominando en el proceso la convección.

En un proceso de secado de una lámina de agua Keen (1914), Fisher (1923; 1927), Sherwood (1929a y b; 1930; 1932) y Sherwood y Comings (1933) determinaron las condiciones de cálculo de D_w y h_m a partir del número de Reynolds y el número de Schmidt para que las ecuaciones (1) y (2) fueran aplicables, pero consideran sus

valores constantes durante el proceso. En general sus determinaciones siguen siendo aplicables mientras la masa porosa se encuentre saturada de agua. Sin embargo, una vez la humedad sea menor a la saturación es necesario adecuar los modelos puesto que D_w y h_m van variando en función de la humedad y la temperatura. Por otra parte, no consideran los fenómenos de transferencia de calor que están íntimamente ligados a los de transferencia de masa en un proceso de secado.

Para abordar estas consideraciones, los investigadores del secado lo han tratado en dos vertientes. Por un lado, algunos equipos de investigación optaron por una línea basada en obtener ecuaciones que describen el proceso a partir de datos obtenidos de forma experimental a través de gráficos de secado (investigación empírica) y, por otro, que optaron por profundizar en el modelo matemático que describe el proceso obteniendo parámetros con significado físico (investigación teórica predictiva).

Investigación empírica del proceso.

Algunas investigaciones experimentales como las de Babiak y Kudela (1995), demuestran distintas fases de secado. Primer periodo de velocidad de secado constante *constant-rate period*, cuando la humedad es superior al punto de saturación de las fibras (*FSP*). Tras este punto, se inicia un periodo donde la velocidad de secado decrece rápidamente, llamado *falling-rate period*. Cuando la humedad alcanza el punto de equilibrio, la velocidad de secado llega al valor cero.

La definición del *FSP* ha sido muy debatida hasta el momento. Zelinka *et al.* (2016) definió un nuevo punto del proceso (basado en soluciones termodinámicas) distinto del *FSP*, llamado contenido crítico de humedad (x_c), que es el más preciso a la hora de establecer el punto de transición del periodo de velocidad de secado constante al periodo con velocidad de secado decreciente.

En las investigaciones de Inoué *et al.* (2010), estudiando los efectos de la temperatura en bulbo seco y húmedo en los tiempos de secado de materiales en procesos convectivos con aire forzado en condiciones ambientales, aire forzado caliente y con vapor sobrecalentado, indicaron que la humedad crítica del material no era una característica fija del mismo, sino que dependía de la temperatura del aire y de la velocidad de secado en el periodo constante. La velocidad de secado constante la calculaba a partir de la transferencia de calor, mediante la ecuación (5), donde h es el coeficiente de transferencia de calor combinado de convección y radiación (W/m²K), T es la temperatura del bulbo seco (K), T_{bh} es la temperatura del bulbo húmedo, y λ_w es el calor latente de evaporación específico a temperatura del proceso (J/kg).

$$\dot{m}_w = \frac{h \cdot (T - T_{bh})}{\lambda_w} \quad (5)$$

Inoué *et al.* (2010) propusieron un modelo de regresión lineal para el cálculo de la humedad crítica (x_c), obteniendo un coeficiente de determinación $R^2=0.97$

$$x_c = 0.063829 \cdot \dot{m}_w - 0.00168 \cdot T_{bh} + 0.250371$$

Con ello, concluyeron que el punto crítico de humedad es bajo con temperaturas del bulbo húmedo altas y constante a temperaturas bajas. Es muy importante este estudio del punto crítico de humedad del material estudiado, pues puede resultar muy útil para ayudar a determinar el punto final del proceso de secado. Una vez predicho la humedad crítica para el periodo con velocidad de secado constante, Chanpet *et al.* (2020) describe la cinética como:

$$\dot{m}_w = -\frac{m_0}{A} \frac{dx}{dt} \quad \text{ó} \quad \frac{dx}{dt} = -\dot{m}_w \frac{A}{M_0} = -k_l$$

$$x = x_0 - k_l t = x_0 - \dot{m}_w \frac{A}{M_0} t$$

donde $\dot{m}_w$ es la velocidad de secado (g de agua/s m²), m_0 y A son la masa seca (g) y su área de transferencia de humedad (m²), x humedad del solido en base seca.

Para el periodo con ratio de secado decreciente, Chanpet *et al.* (2020) la cinética de secado la define como:

$$\dot{m}_w = -\frac{m_0}{A} \frac{dx}{dt} = K(x - x_e) \quad \text{para} \quad \omega < \omega_s$$

$$\frac{dx}{x - x_e} = -K \frac{A}{m_0} dt$$

$$\ln \ln \frac{x - x_e}{x_c - x_e} = -K \frac{A}{m_0} t$$

$$\frac{x - x_e}{x_c - x_e} = e^{-K \frac{A}{m_0} t}$$

donde x_c es el contenido de humedad crítico que separa el periodo con ratio de secado constante del periodo con ratio de secado decreciente, y x_e es la humedad en el equilibrio. El primer término de la ecuación se denomina Ratio de humedad MR (Dedić, 2002; Kumar, *et al.*, 2012; Promtong, 2012), tal que:

$$MR = \frac{x - x_e}{x_c - x_e}$$

Hay amplios estudios que relacionan la variación del ratio de humedad (MR) con tiempo en un proceso de secado, tales como los de Wang y Brennan (1992, 1993a, 1993b), Simal *et al.* (1994, 1995, 1998), Haroni y Hubinger (1998) y Velic *et al.* (2004). Todos ellos usaron modelos empíricos mostrados en la Tabla 2, que son aplicables en el periodo de secado de velocidad decreciente, obteniendo los coeficientes para condiciones particulares.

Un ejemplo de investigación empírica es el trabajo de Khamtree *et al.* (2019), quienes probaron todos los modelos empíricos de la Tabla 2, para el cálculo de la cinética de secado del caucho

Tabla 2. Modelos de cálculo del ratio de humedad (MR) en los porcesos de secado.

Model name	Model equation	Reference
Page	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \exp(-k, t^n)$	Page (1949)
Henderson y Pabis	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = a * \exp(-k, t)$	Henderson (1961)
Logarithmic	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \exp(-k, t) + c$	Togrul and Pehlivan (2002)
Two-term exponential	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \exp(-k, t) + (1 - a)\exp(-k, a, t)$	Chandra and Singh (1995)
Diffusion approach	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \exp(-k, t) + (1 - a)\exp(-k, b, t)$	Kumar <i>et al.</i> (2012)

con un secador de aire caliente. De cada uno se obtuvieron los parámetros de las constantes para casos particulares. El modelo que mejor se adaptaba a los datos experimentales obtenidos en el secado de caucho era el de Henderson (1961) para el cual llegan a obtener que para una temperatura de secado de 90 °C el valor de k es igual a 0.0008, y el de a es igual a 1.038 (con una $R^2=0.9963$ y un error cuadrático medio de 0.00015). No obstante, los coeficientes a y k se ven influenciados por la temperatura del proceso de tal manera que, a medida que la temperatura aumenta, la velocidad de secado también era mayor. También indicaron que las propiedades físicas del caucho podrían variar y las ecuaciones obtenidas no son aplicables a diferentes cauchos. Además, las condiciones de su experimentación podrían no hacer aplicable este modelo a otros procesos de secado con diferentes condiciones de ensayo.

Ananias *et al.* (2020) propusieron una estimación del valor de la resistencia global de transferencia de masa (K) a través de la ecuación:

$$\frac{1}{K} = \alpha_0 \exp\left(\frac{c_0}{T_K}\right) e + b_0 \exp\left(\frac{c_0}{T_K}\right) v^{-P} \exp\left(\frac{-Z}{x_{FSP} - x_e}\right)$$

donde $x_{FSP} - x_e$ es la diferencia entre el punto de saturación de las fibras y el contenido de

humedad en el equilibrio para una temperatura del aire y humedad relativa específicas. T_K es la temperatura en grados Kelvin (K) y e es el espesor de los sólidos a secar, v es la velocidad del aire. Los parámetros de esta ecuación particularizados para maderas de picea (*Picea abies*) y haya (*Fagus sylvatica*) establecen el modelo:

$$\frac{1}{K} = 0.12 \exp\left(\frac{2683}{T_K}\right) e + 23.9 \exp\left(\frac{2683}{T_K}\right) v^{-0.8} \exp\left(\frac{\frac{HR}{100} - 1}{x_{FSP} - x_e}\right)$$

Nótese que la resistencia global de la transferencia de masa sólo depende de la temperatura del proceso, humedad de saturación de fibra y humedad en el equilibrio. La humedad de saturación de la fibra (x_{FSP}) podría aproximarse a la humedad crítica (x_c).

Mierzwa y Musielak (2023) para comparar la efectividad de los diferentes métodos de secado desde el punto de vista cinético, evaluaron la constante de secado β . Para ello, asumieron que la ratio de evaporación del material secado es proporcional a la diferencia entre la masa en un instante (m) y la masa en el equilibrio húmedo (m_e):

$$\frac{dm}{dt} = -\beta \cdot (m - m_e)$$

donde m_e es el equilibrio en la muestra de masa.

Así, obtuvieron la siguiente solución a la ecuación anterior:

$$m = m_e + C \cdot e^{-\beta t}$$

Obteniendo el valor de la constante de secado C de forma experimental.

Chandra y Talukdar (2010) continuaron su línea de investigación modelizando procesos de secado de materiales porosos y húmedos a partir de datos experimentales. En este caso, se estudió el secado con aire caliente de láminas de patata de dimensiones predefinidas (4x2x2 cm), siendo en este caso las temperaturas del aire del secador variables entre 40, 50, 60 y 70 °C. La velocidad del aire siempre fue de 2 m/s. A partir de los datos obtenidos, los investigadores llegaron a una serie de conclusiones realmente interesantes. La primera de ellas fue que, en los primeros instantes del proceso, la ratio de secado es muy rápida, puesto que el contenido de humedad es elevado, de forma que al principio el material pierde el agua libre de su superficie, para lo cual se requiere de poca energía, que aporta rápidamente el aire caliente que incide sobre el objeto. La densidad del material es

directamente proporcional a la humedad del material, de forma que, a mayor contenido en humedad, mayor densidad. Cuando se realiza un proceso de secado, a medida que avanza este con el tiempo, menor contenido de humedad presenta el material y, por tanto, menor densidad. Para alcanzar esta conclusión, Chandra y Talukdar (2013) relacionaron la densidad medida experimentalmente con la ecuación de correlación creada por Wang y Brennan (1993b):

$$\rho = A_1 + A_2 \cdot e^{A_3 x^2}$$

donde, A_1 , A_2 y A_3 son constantes a una temperatura de secado de 40°C (1.08, 0.3 y -0.325, calculadas a partir de una regresión no lineal) y x es el contenido de humedad del material. Por otro lado, Mierzwa y Musielak (2023) compararon el secado convectivo mediante microondas con el secado híbrido mediante infrarrojos.

Investigación teórica predictiva

La investigación teórico-predictiva intenta realizar modelizaciones basadas en las ecuaciones de balances de masa y energía, junto los modelos de transferencia de masa y calor. La modelización debe contemplar tres balances:

Balance de masa de agua

$$\dot{m}_{aire} \cdot (\omega - \omega_{aire1}) = m_s \cdot (x - x_e)$$

Balance de energía en el aire

$$\begin{aligned} \dot{m}_{aire} \cdot \left[\left(C_{p_{aire}} \cdot T + \omega \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T) \right) - \left(C_{p_{aire}} \cdot T_1 + \omega_{aire1} \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T_1) \right) \right] \\ = K \cdot A \cdot h_w \cdot (x - x_e) + h \cdot A \cdot (T - T_b) \end{aligned}$$

Balance de energía en la biomasa

$$\begin{aligned} m_s \cdot (C_{p_b} + x \cdot C_{p_w}) \frac{dT_b}{dt} + m_s \cdot \lambda \cdot \frac{dx}{dt} \\ = \dot{m}_{aire} \cdot [(\lambda + C_{p_v} \cdot T_e) \cdot (\omega - \omega_{aire1}) + (C_{p_{aire}} + \omega C_{p_v}) \cdot (T - T_e)] \end{aligned}$$

$$\dot{m}_w = \frac{m_s}{A} \cdot \frac{dx}{dt} = K \cdot (x - x_e)$$

donde T es la temperatura del aire, T_b es la temperatura de la biomasa. Las variables incógnitas son ω , T , x , T_b . Salinas *et al.* (2015) y Pang (2007) ya advierten que para simular y modelizar el secado de madera es necesario realizar fuertes simplificaciones del proceso y de los factores que lo gobiernan, como, por ejemplo, considerar la madera a secar un medio continuo, eliminando la heterogeneidad del material, o tomar la temperatura del aire de la corriente de aire constante durante el proceso de secado.

Algunos autores han diseñado modelos cinéticos de secado basados en procesos de transferencia de masa. Tremblay *et al.* (2000) a partir de un método experimental, buscaron la determinación del coeficiente de transferencia de calor y masa por convección en *Pinus resinosa* A. basándose en el contenido de humedad, estableciendo como fuerza impulsora del intercambio de calor y masa la diferencia de potencial hídrico entre la superficie de la madera y el aire. Sus conclusiones fueron que el coeficiente varía en función de la velocidad de aire, a mayor velocidad, mayor coeficiente, y se muestra constante hasta alcanzar valores de humedad en la superficie de la madera próximos al 80%.

Por su parte, otros autores diseñaron modelos de secado basados en la teoría de Whitaker (1977; 1998), desarrollada por Nasrallah y Perré (1988), Perré y Degiovanni (1990), Perré *et al.* (1993), Turner y Ferguson (1995a y 1995b), Turner (1996), Perré y Turner (1999) y Jalil *et al.* (2013). Sus modelos se basan en la conservación de la energía para modelizar el secado de una partícula de pino de geometría cilíndrica infinita como medio poroso. Para ello, utilizan la ecuación:

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s + \varepsilon_{fw} + \varepsilon_{bw} = 1$$

donde la suma de las fracciones de volumen de cada fase (mezcla de gas: g , sólido: s , agua libre: fw y agua ligada: bw) es igual a 1. Así, investigaron nueve propiedades físicas (conductividad

térmica efectiva, capacidad calorífica específica, permeabilidades intrínsecas de gas y líquido, permeabilidades relativas de gas y líquido, presión capilar, difusividad del agua ligada y difusividad efectiva del vapor de agua) y los coeficientes de transporte del modelo. Los autores concluyeron que estas propiedades mostraron un notable impacto en el tiempo de secado previsto, de las cuales, la permeabilidad intrínseca del gas fue la más influyente en el modelo.

Por su parte, Chávez *et al.* (2021) elaboraron un modelo capaz de simular simultáneamente la transferencia de masa y calor a baja temperatura en pequeñas masas de madera de la especie *Pinus radiata* D. Don., prediciendo las tensiones mecánicas durante el proceso de secado. En particular, los valores del coeficiente de transferencia de calor local (h) fueron calculados por la Analogía de Colburn, lo que permitió encontrar los valores en términos de coeficientes de masa por convección k_r (radial) y de k_t (tangencial), respectivamente (Sánchez-Escalona *et al.*, 2020).

$$h_m = k_r \left(\frac{K_w}{D_{air}} \right) \left(\frac{Sch}{Pr} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

donde h_m es el coeficiente local de transferencia de masa (agua), k_r la conductividad radial, K_w es la permeabilidad, D_{air} es la difusividad, Sch es el número de Schmidt y Pr el número de Prandtl.

Simo-Tagne *et al.* (2016) modelaron para dos tipos de madera tropical (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum. y *Terminalia superba* Engl. & Diels.) las transferencias de calor y masa durante su secado. Para dichos cálculos utilizaron datos termofísicos recopilados de forma experimental en su mayoría, obteniendo el resto mediante revisión bibliográfica. Los resultados que obtuvieron con su modelo, fueron comparados con los obtenidos por el modelo de Luikov (1966) y por los obtenidos de forma experimental. El modelo se basó en:

$$h_m = \frac{D_w \cdot Sh}{D_h}$$

donde h_m es el coeficiente de transferencia de masa (agua), D_w es el coeficiente de difusión del agua causado por el gradiente de humedad, Sh es el número de Sherwood (Sherwood, 1929a y b; 1930; 1932; Sherwood y Comings, 1934) y D_h es el diámetro hidráulico (distancia consecutiva entre dos filas de las muestras).

Al realizar la comparación de resultados entre el modelo propuesto por Simo-Tagne *et al.* (2016) y el de Luikov (1966), se comprobó que, si bien ambos modelos presentaban la misma evolución en el contenido de humedad de la muestra a lo largo del proceso de secado, en la evolución de la temperatura las diferencias eran amplias. Cabe destacar que el modelo propuesto no tenía en cuenta factores como los dominios higroscópicos y no higroscópicos de las especies adultas.

Algunos autores han introducido a sus investigaciones sobre el proceso de secado un nuevo factor a tener en cuenta, la porosidad del material. Así, Inoué *et al.* (2009) investigaron el impacto de la distribución del tamaño de los poros en la transferencia de calor y humedad en materiales porosos durante el secado. Para ello, utilizaron tanto enfoques teóricos como experimentales, estimando a partir de ellos los coeficientes de transferencia de humedad. Así, la difusividad del agua (D_w) la estimaron como:

$$D_w = \frac{\sigma_w}{\eta_w} K x^3 = (1.604T - 394.3) K x^3$$

donde σ_w es la tensión superficial del agua, η_w es la viscosidad del agua y K es la constante de transferencia del agua. Tanto σ_w como η_w dependen de la temperatura, mientras que K depende de la estructura de los poros. T es la temperatura del material.

Inoué *et al.* (2009) analizaron que cuando la suma del calor por convección y radiación en la superficie del material es mayor que la conducción hacia el interior de la masa, comienza la evaporación de la humedad en la superficie del material y la temperatura de la superficie aumenta. En el primer periodo se cumplen las siguientes ecuaciones: En primer lugar, el calor empleado en la evaporación del agua en la superficie es igual al calor que se recibe por convección más el calor que se recibe por radiación menos el calor que se transfiere al interior de la pieza por conducción.

$$\dot{m}_w \cdot \lambda_w = q_{conv} + q_{rad} - k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R}$$

Sólo cuando la temperatura central alcanza la temperatura de la superficie, la tasa de evaporación $\dot{m}_w$ se vuelve constante. Por otra parte, el flujo de agua en el interior de la masa y el agua evaporada en la superficie son equivalentes:

$$\dot{m}_{wi} = \dot{m}_w$$

$$D_w \cdot \rho_{sólido} \cdot \varepsilon_w \frac{dx}{dr} \Big|_{r=R} = h_m \cdot \rho_{aire} \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire})$$

En la segunda etapa, si no hay humedad local presente en la superficie (contenido de humedad inferior al crítico) el flujo de agua interno $\dot{m}_{wi}$ no puede llegar a ser igual a $\dot{m}_w$, y el plano de evaporación (δ) se mueve hacia el interior del material. El valor de $\dot{m}_w$ disminuye porque aumenta la resistencia térmica en la región seca del material, comenzando el período de velocidad de secado decreciente.

En esta etapa el calor recibido por convección y por radiación desde la superficie es igual al calor que se disipa por conducción hacia el interior de la masa. El plano de desecación retrocede hacia el interior alejándose de la superficie. En ese plano una parte del calor que se recibe por conducción desde la superficie se transfiere al agua en

proceso de evaporación, otra parte se transfiere hacia el interior también por conducción.

$$q_{conv} + q_{rad} = k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R}$$

$$\dot{m}_{wi} \cdot \lambda_w = k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=\delta^+} - k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=\delta^-}$$

$$\dot{m}_{wi} = D_w \cdot \rho_{sólido} \cdot \varepsilon_w \frac{dx}{dr} \Big|_{r=\delta}$$

$$\dot{m}_w = \frac{\delta^2}{R^2} \cdot \dot{m}_{wi}$$

La gran aportación de Inoué es establecer una relación entre el agua vaporada en la superficie y el agua evaporada en el interior de la masa cómo relación de distancias al cuadrado. De esta forma, establecieron relaciones entre el contenido de humedad y la temperatura, tanto en la superficie como en el núcleo del material, con el tiempo de secado. El coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de transferencia de agua por convección lo calcula como:

$$h = \frac{k_{aire}}{2R} \left(2.0 + 0.60 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$h_m = \frac{D_w}{2R} \left(2.0 + 0.60 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \right)$$

Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer de la revisión bibliográfica es que el proceso de secado es un proceso matemáticamente complejo de modelar que conviene tratarlo con ecuaciones diferenciadas en dos etapas, unas para la fase de secado de velocidad constante y otras para la fase de secado de velocidad decreciente. Aunque se han propuesto aproximaciones muy loables en ambas, es un campo que todavía requiere profundización debido a que las variables implicadas están condicionadas al tipo de materia (porosidad), su humedad, la temperatura, y condiciones del aire convectivo (velocidad, temperatura, humedad del aire).

La modelización de la fase de secado con velocidad constante puede realizarse a partir de la ecuación de transferencia de masa por convección (2). La utilización del número de Reynolds y el número de Schmidt para el cálculo del coeficiente h_m con las analogías de las correlaciones utilizadas para la transferencia de calor para el cálculo de h , sustituyendo el número de Prandtl por el número de Schmidt, requieren revisión puesto que presentan desviaciones en la biomasa, y no son aplicables en la fase de secado de velocidad decreciente.

Sugerencias para investigaciones futuras han sido introducidas en las conclusiones y también en la discusión de los modelos. Una de las más importantes es estudiar la variación de difusividad en función de la humedad en estructuras porosas, así como la variación del coeficiente de transferencia por convección. Algunas investigaciones modernas están avanzando en este sentido, tales como Haya *et al.* (2024).

La modelización de la fase de secado con velocidad variable debe centrarse en la variación de D_w o K en función de la humedad del material y la temperatura. Existen iniciativas en la medición de estas variables, por ejemplo, con la patente P202330957 de la Universitat Politècnica de València (Velázquez *et al.*, 2023). Para ello se ha de asumir:

$$D_w \cdot \rho_{sólido} \cdot \varepsilon_w \frac{dx}{dr} \Big|_{r=R} = h_m \cdot \rho_{aire} \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire})$$

La variabilidad de D_w o K en cada material obliga a generar una base de datos de las ecuaciones específicas para el cálculo de estos parámetros para cada tipo de material en función de la humedad y temperatura, es decir, para distintos tipos de madera, alimentos, pieles, cerámicas, minerales etc. La generación de esta base de datos para poder predecir las velocidades y tiempos de secado es un reto científico. Esto significa que la investigación en la cinética de secado no es una línea extinguida, sino que requiere todavía desarrollo.

A	Área de transferencia de masa
D_w	Difusividad de masa
ε_w	Porosidad del material
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección
h_m	Coeficiente de transferencia de masa por convección
λ	Entalpía de evaporación a 0°C (Calor latente)
λ_w	Entalpía de evaporación a una temperatura (Calor latente)
k	Conductividad térmica
K	Resistencia global de transferencia de masa
m_s	Masa del sólido
$\dot{m}_{aire}$	Flujo de aire
$\dot{m}_w$	Flujo de agua evaporada en una superficie externa
$\dot{m}_{wi}$	Flujo de agua evaporada en una superficie externa
T	Temperatura del aire
T_b	Temperatura de la biomasa
ω	Humedad instantánea del aire
ω_{aire}	Humedad absoluta del aire
ω_{sat}	Humedad absoluta del aire saturado en la superficie del material
x	Humedad del material sólido
x_c	Humedad crítica
x_e	Humedad del material en el equilibrio
x_0	Humedad del material inicial

Agradecimientos

A la red RIETI-CYTED justamente por permitirnos compartir experiencias en el campo de las energías renovables y enriquecernos con los conocimientos aportados por los estudios desarrollados en las instituciones integrantes. Se agradece el arbitraje por parte del Dr. Artemio Carrillo.

Referencias

- Ananias, R. A., Chrusciel, A., Zoulalian, A., Salinas-Lira, C., & Mougel, E. (2020). Overall mass transfer coefficient for wood drying curves predictions. In M. El-Amin (Ed.), *Mass transfer in multiphase systems and its applications*.
- Babiak, M., & Kudela, J. (1995). A contribution to the definition of the fiber saturation point. *Wood Science and Technology*, 29 (3), 217-226.
- Baroni, A. F., & Hubinger, M. D. (1998). Drying of onion: Effects of pretreatment on moisture transport. *Drying Technology*, 16 (9&10), 2083-2094.
- Chandra, P.K.; SINGH, R.P. (1995). *Applied numerical methods for food and agricultural engineers*. CRC Press. Boca Raton, USA.
- Chandra, M., & Talukdar, P. (2010). Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 , 4638-4650.
- Chandra, M., & Talukdar, P. (2013). Design of an experimental set up for convective drying: Experimental studies at different drying temperature. *Heat and Mass Transfer*, 49, 31-40.
- Chanpet, M., Rakmak, N., Matan, N., & Siripatana, C. (2020). Effect of air velocity, temperature, and relative humidity on drying kinetics of rubberwood. *Heliyon*, 6, e05151.
- Chávez, C. A., Moraga, N. O., Salinas, C. H., Cabrales, R. C., & Ananías, R. A. (2021). Modeling unsteady heat and mass transfer with prediction of mechanical stresses in wood drying. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 123, 105230.

- Çencel, Y.; Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw Hill. México. 919 pp
- DJ. Dedić, A. (2002). Modelling of coupled heat and mass transfer during convective drying of wood. *Drying Technology*, 20 (6), 1299–1301.
- Faghri, A., Zhang, Y., & Howell, J. (2010). *Advanced heat and mass transfer*. Global Digital Press.
- Fisher, E. A. (1923). Some factors affecting the evaporation of water from soil. *Journal of Agricultural Science*, 13, 121-143.
- Fisher, E. A. (1927). Some factors affecting the evaporation of water from soil II. *Journal of Agricultural Science*, 17, 407-419.
- Henderson, S. M. (1961). Grain drying theory: Temperature effects of drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-174.
- Inoué, T.; Iyota, H.; Nishimura, N. (2009). Effect of pore size distribution on heat and moisture transfer in porous material for high humidity hot air and superheated steam drying. *Journal of JSEM*, 9: 54-59
- Inoué, T., Iyota, H., Nishimura, N. (2010). Prediction method for drying time of wet porous material in humid hot air and superheated steam. *Drying technology*, 28: 608-614
- Jalili, M.; Anca-Couce, A.; Zobel, N. (2013). On the uncertainty of a mathematical model for drying of a wood particle. *Energy Fuels*, 27: 6705-6717
- Keen, B. A. (1914). The evaporation of water from soil. *Journal of Agricultural Science*, 6 , 456-475.
- Khamtree, S., Ratanawilai, T., & Nuntadusit, C. (2019). Empirical modeling of air-dried rubberwood drying system. *International Journal of Structural and Construction Engineering*, 13 (7), 428-431.
- Khamtree, S., Ratanawilai, T., Nuntadusit, C., & Marzbani, H. (2020). Experimental study and numerical modeling of heat and mass transfer in rubberwood during kiln drying. *Heat and Mass Transfer*, 57 (3), 453–464.
- Koukouch, A., Bakhattar, I., Asbik, M., Idlimam, A., Zeghami, B., & Aharoune, A. (2020). Analytical solution of coupled heat and mass transfer equations during convective drying of biomass: Experimental validation. *Heat and Mass Transfer*, 56 (6), 1971–1983.
- Kumar, N., Sarkar, B. C., & Sharma, H. K. (2012). Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of Food Science Technology*, 49 (1), 33-41.
- Kuznetsov, G. V., Syrodoy, S. V., Nigay, N. A., Maksimov, V. I., & Gutareva, N. Y. (2021). Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass. *Renewable Energy*, 169 , 498–511.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2007). *Advanced drying technologies* (2nd ed.). Taylor & Francis Group, 478 p.
- Luikov, A.V. (1966). *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*. Pergamon Press, Oxford.
- Mierzwa, D., & Musielak, G. (2023). Convective-Microwave-IR hybrid drying of kaolin clay-kinetics of process. *Applied Sciences*, 13 , 7451.
- Mills, A.F. (1995). *Basic Heat and Mass Transfer*. Irwin Pub

- Mujumdar, A. S. (2007). Handbook of industrial drying . Drying Technology, 25 , 1143-1144.
- Nasrallah, S.B.; Perré, P. (1988). Detailed study of a model of heat and mass transfer during convective drying of porous media. Int. J. Heat and Mass Transfer, 31(5): 957 – 967
- Page, G. E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers (Master's thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana).
- Pang, S. (2007). Mathematical modeling of kiln drying of softwood timber: model development, validation and practical application. Dry Technology, 25(3): 421-431
- Perré, P., Degiovanni, A. (1990). Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. Int. J. Heat Mass Transfer, 33 (11): 2463-2478
- Perré, P.; Moser, M.; Martin, M. (1993). Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam and moist air. Int. J. Heat and Mass Transfer, 36(11):2725-2746.
- Perré, P.; Turner, I. W. (1990). A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. Int. J. Heat Mass Transfer 42: 4501–4521
- Saha, A. K. (2006). Three-dimensional numerical study of flow and heat transfer from a cube placed in a uniform flow. International Journal of Heat and Fluid Flow, 26 , 80-94.
- Salinas, C.; Chavez, C.; Ananias, R.A.; Elustondo, D. (2015). Unidimensional simulation of drying stress in radiata pine wood. Dry. Technol. 33(8): 996-1005
- Sánchez-Escalona, A. A.; Góngora-Leyva, E.; Retirado-Mediaceja, Y.; Camaraza-Medina, Y. (2020). Ecuación generalizada del número de Nusselt para integrar las analogías de Reynolds-Colburn, Prandtl y Von-Kármán. X Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales Taller ELECTROMECC'20
- Sherwood, T. K. (1929a). The drying of solids I. Industrial and engineering chemistry, 21(1): 12-16.
- Sherwood, T. K. (1929b). The drying of solids II. Industrial and engineering chemistry, 21(10): 976-980.
- Sherwood, T. K. (1930). The drying of solids III. Industrial and engineering chemistry, 22(2): 132-136.
- Sherwood, T. K. (1932). The drying of solids IV. Industrial and engineering chemistry, 22: 307-310.
- Sherwood, T.K., & Comings, E.W. (1933). The drying of solids V. Industrial and Engineering Chemistry, 25 , 150-168.
- Sherwood, T. K.; Comings, E.W. (1934). The drying of solids VII. Industrial and engineering chemistry, 26: 1096-1098
- Siau, J. F. (1995). Wood: Influence of moisture on physical properties . Virginia Polytechnic Institute and State University, 227 p.
- Simal, S., Rosello, C., Berna, A., & Mulet, A. (1994). Heat and mass transfer model for potato drying. Chemical Engineering Science, 49 , 3739-3744.
- Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J., & Rosello, C. (1995). Drying models for green peas. Food Chemistry, 55 (2), 121-128.

- Simal, S., Rosello, C., Berna, A., & Mulet, A. (1998). Drying of shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering*, 37, 423-435.
- Simo-Tagne, M.; Rémond, R.; Rogaume, Y.; Zoulalian, A.; Bonoma, B. (2016). Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods. *International Journal of Thermal Sciences*, 109, 299–308.
- Sychevskii, V.A. (2018). Heat and mass transfer in convective wood-drying plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 91 (3), 705-711.
- Togrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55 (3), 209-216.
- Tremblay, C., Cloutier, A., & Fortin, Y. (2000). Determination of the effective water conductivity of red pine sapwood. *Wood Science and Technology*, 34 (2), 109-124.
- Turner, I.W. (1996). A two dimensional orthotropic model for simulating wood drying process. *Applied Mathematical Modelling*, 20(1): 60-81
- Turner, I.W.; Ferguson, W.J. (1995a). An unstructured mesh cell-centered control volume method for simulating heat and mass transfer in porous media: application to softwood drying, part I: the isotropic model. *Applied Mathematical Modelling*, 19 (11): 654-667
- Turner, I.W.; Ferguson, W.J. (1995b). An unstructured mesh cell-centered control volume method for simulating heat and mass transfer in porous media: application to softwood drying—part II: the anisotropic model. *Applied Mathematical Modelling*, 19 (11): 668-674
- Turner, I.W.; Perré, P. (1998). The use of implicit flux limiting schemes in the simulation of the drying process: a new maximum flow sensor applied to phase mobilities. *Journal of Applied Mathematical Modelling*, 25(6): 513-540
- Velázquez Martí, B. (2023). Aparato medidor de transferencia de masa. Universidad Politécnica de Valencia, P202330957. 21 Nov 2023
- Velic, D., Planinic, M., Tomas, S., & Bili, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64, 97-102.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1993a). A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*, 24, 47-60.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1993b). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24, 61-76.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1992). Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. *Journal of Food Engineering*, 17, 153-160.
- Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying, *Advances in Heat Transfer* 13: 119-203.
- Whitaker, S. (1998). Coupled transport in multiphase systems: a theory of drying, *Advances in Heat Transfer* 31: 1-104.
- Zelinka, S.L., Glass, S.V., Jakes, J.E., & Stone, D.S. (2016). A solution thermodynamics definition of the fiber saturation point and the derivation of a wood-water phase (state) diagram. *Wood Science and Technology*, 50 (3), 443-462.
- Manuscrito recibido: 29 de agosto de 2024
 Recepción del manuscrito corregido: n/a
 Manuscrito aceptado: 13 de septiembre de 2024

Bioenergía y desarrollo sostenible: Alternativas en la producción de biocombustibles

Carmina Reyes Plascencia^{1*}, Kiby Mora¹, Nestor Tancredi^{1,2}

¹Energías Renovables, Instituto Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, Universidad de la República,
Pando, Uruguay, 91000

²Área de Físicoquímica, DETEMA, Facultad de Química, Universidad de la República,
Montevideo, Uruguay, 11800

*carmina@fq.edu.uy

Resumen

La energía es fundamental para el desarrollo. Sin embargo, aún no se ha logrado un acceso completo y universal a una energía segura, no contaminante y asequible. Una alternativa para enfrentar esta problemática es el uso de la biomasa con fines energéticos, conocida como bioenergía. La bioenergía ofrece diversos beneficios, como la reducción de emisiones netas de gases de efecto invernadero, la diversificación de la matriz energética, el aumento del empleo en zonas rurales y de la inversión económica. Además, la utilización de residuos de biomasa para su generación ayuda a mitigar problemáticas ambientales relacionadas con la gestión de residuos. En este trabajo se abordan diversos aspectos del aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos, como los tipos de biomasa y su disponibilidad, los procesos para su transformación en biocombustibles, con especial énfasis en los procesos termoquímicos y las implicaciones ambientales, sociales y económicas de la implementación de la bioenergía.

Palabras clave: Bioenergía, Biomasa, Biocombustibles

Abstract

Energy is fundamental for development. However, complete and universal access to safe, non-polluting, and affordable energy has yet to be achieved. An alternative to address this issue is using biomass for energy purposes, known as bioenergy. Bioenergy offers various benefits, such as reducing net greenhouse gas emissions, diversifying the energy matrix, increasing employment in rural areas, and promoting economic investment. Additionally, using biomass residues for energy generation helps mitigate environmental issues related to waste management. This work addresses various aspects of biomass utilization for energy purposes, such as the types of biomasses and their availability, the processes for transforming biomass into biofuels, with a particular emphasis on thermochemical processes, and the environmental, social, and economic implications of bioenergy implementation.

Key words: Bioenergy, Biomass, Biofuels.

Introducción

El desarrollo de la humanidad está íntimamente ligado a la energía. Desde su sentido más básico, la energía metabólica es esencial para cumplir las funciones biológicas. Una vez cubierta esta necesidad, el uso de fuentes de energía externa para generar trabajo o calor se vuelve indispensable. El control del fuego permitió a los homínidos cocinar alimentos, protegerse contra

depredadores y realizar actividades nocturnas. El uso de la energía hidráulica permitió al humano moler grano en civilizaciones como Mesopotamia y el Antiguo Egipto. La energía eólica posibilitó el desarrollo de la navegación a vela, facilitando el intercambio cultural y comercial.

El desarrollo de la máquina de vapor marcó el inicio de la Revolución Industrial, transformando la producción y la economía. Este hito propició

la incorporación de combustibles fósiles como fuente de energía. Posteriormente, el petróleo, con el primer pozo comercial perforado en 1859, se convirtió en una fuente de energía crucial para el transporte, la industria y la electricidad.

El uso masivo de recursos fósiles con fines energéticos ha causado un desbalance en la composición atmosférica, incrementando la concentración de CO₂ de 260 ppm antes de la Revolución Industrial, a 427 ppm en la actualidad (NASA, 2024). Debido al efecto invernadero de estos gases, la temperatura global ha aumentado por encima de los registros históricos provocando el cambio climático. Esto contribuye a la acidificación de los océanos y tiene impactos negativos en diversas áreas como la biodiversidad, la agricultura y la salud humana. Debido a esta problemática, es necesario adoptar modelos de energía sostenible que logren cubrir los requerimientos energéticos actuales y permitan el desarrollo socioeconómico inclusivo de manera asequible, sin comprometer los recursos futuros.

En este sentido, el uso de energías renovables toma un papel preponderante. Entre ellas, la energía que proviene de la biomasa, conocida como bioenergía. Esta es una alternativa prometedora para su incorporación en la matriz energética debido a diversas características, como su versatilidad, posibilidad de almacenamiento en forma de biocombustibles y amplia disponibilidad en diversas regiones. Además, su producción permite paliar otras problemáticas como son la gestión de residuos y el fomento del empleo local.

Este trabajo tiene como propósito ofrecer una comprensión integral de la adopción de la biomasa como fuente de energía, fomentando el desarrollo sostenible. Para esto se ahonda en los tipos y disponibilidad de la biomasa, los procesos de transformación para la producción de biocombustibles, con foco en los procesos termoquímicos y las implicaciones ambientales,

sociales y económicas que tiene su uso en la producción de bioenergía.

Tipos de biomasa y disponibilidad

La bioenergía puede provenir directamente de la biomasa, comúnmente mediante la combustión de esta, o mediante el uso de biocombustibles. El término biomasa se refiere a cualquier material de origen biológico que no haya sufrido transformaciones geológicas (FAO, 2004). Mientras que los biocombustibles, son los combustibles obtenidos a partir de la biomasa mediante tratamientos físicos o químicos que tienen como finalidad la producción de energía (Guo *et al.*, 2015).

Se estima que la biomasa terrestre es suficiente para cubrir ocho veces el consumo energético anual de los humanos (World Bioenergy Association, 2016). Sin embargo, no es posible utilizar toda la biomasa existente, por lo que se diferencian cuatro potenciales: máximo, técnico, económico y de implementación. El potencial máximo, se refiere a la biomasa total disponible en un sistema determinado. El potencial técnico es el disponible utilizando las tecnologías actuales y considerando las limitantes de uso de suelo y ecológicas. No obstante, no toda la biomasa técnicamente disponible es económicamente viable; a la fracción técnica y económicamente aprovechable se le conoce como potencial económico. Por último, el potencial de implementación es la fracción de la biomasa que se puede utilizar en cierto marco temporal y bajo condiciones sociopolíticas concretas, incluidas las restricciones institucionales y sociales y los incentivos políticos (World Bioenergy Association, 2016). La determinación correcta del potencial de biomasa disponible para su utilización como fuente energética es crucial para el correcto dimensionamiento de las infraestructuras de aprovechamiento, así como para las determinaciones del impacto ambiental de su implementación.

Además del potencial de la biomasa, su impacto ambiental, económico y social está ligado a su origen. En este sentido, la biomasa puede clasificarse como de origen natural, cultivo energético o biomasa residual. La biomasa natural proviene de los ecosistemas sin modificación antropogénica. En los países de bajos ingresos es utilizada ampliamente debido a que permite cubrir las necesidades básicas de energía, como la cocción de alimentos y calefacción. Actualmente, más de 2000 millones de personas siguen utilizando este tipo de biomasa en hogueras abiertas para cocinar sus alimentos (United Nations, 2023). Este tipo de tecnologías, además de ser energéticamente ineficientes causan problemas a la salud debido a la exposición a los humos generados durante la combustión. Además, se desaconseja el uso de la biomasa natural debido a la posible degradación de las biocenosis, a menos que se lleve a cabo un manejo adecuado para su regeneración.

La biomasa proveniente de cultivos energéticos es sembrada específicamente con la finalidad de producir bioenergía, por tanto, la selección de la variedad de cultivo y su manejo busca maximizar la cantidad de energía obtenida en cada cosecha. Entre las especies cultivadas se encuentran biomásas con alto contenido de lípidos, azúcares o almidón y lignocelulósicas, que generalmente son transformadas en biocombustibles. Estos cultivos pueden incluir especies que también se utilizan para otros fines, como el maíz y las especies madereras, o pueden cultivarse exclusivamente para la producción de energía, como el pasto elefante.

Una de las principales controversias en la producción de estas biomásas es el uso de recursos naturales, como la tierra fértil y agua, y la competencia por estos recursos con los cultivos alimentarios. Para garantizar la sostenibilidad en la producción de cultivos energéticos, es esencial evitar la deforestación de ecosistemas naturales para crear nuevas tierras de cultivo y proteger

las tierras agrícolas. Además, es necesario desarrollar variedades de cultivos aptas para suelos marginales, no aptos para la agricultura convencional, y que tengan bajas demandas de agua y nutrientes.

La biomasa residual es la proveniente de otras actividades antropogénicas cuyo destino final es su desecho. Tal es el caso de los residuos orgánicos municipales y los residuos agropecuarios, entre otros. Al convertir estos materiales a bioenergía es posible mitigar el impacto ambiental asociado a su disposición. Además, suelen ser materiales de bajo costo debido a su carácter de desecho y proporcionan ingresos adicionales a los productores al incorporarlos a la cadena de valor. Debido a esto, este tipo de biomasa genera un gran interés para su aprovechamiento energético. No obstante, existen algunos retos técnicos para la implementación de la biomasa como fuente de energía en los sistemas actuales debido a sus características fisicoquímicas: baja densidad energética, alto contenido de humedad, baja estabilidad temporal por degradación microbológica y baja relación H/C y alta relación O/C debido a la presencia de numerosos grupos hidroxilos (Bhaskar y Pandey, 2015). Para hacer frente a esta problemática, la biomasa es transformada en bicomcombustibles, facilitando su almacenamiento, transporte y uso. Además, permite su implementación en la infraestructura actualmente empleada para los combustibles fósiles.

Los biocombustibles se clasifican en primarios y secundarios, según el grado de transformación de la biomasa para su utilización. Los biocombustibles primarios son aquellos donde la biomasa es utilizada de forma natural o con una mínima adaptación para su uso, por ejemplo, la leña o la quema de residuos agrícolas. Mientras que los biocombustibles secundarios requieren procesos de transformación más complejos, como transformaciones químicas.

A su vez, los biocombustibles secundarios se clasifican en generaciones en dependencia de la fuente de biomasa. La primera generación (1G) son los biocombustibles provenientes de biomasa comestible. Esto incluye biomasa oleaginosas (semillas de girasol, soya, lino), alcoholígenas (caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha) y amiláceas (tubérculos, granos de cereales) (Tajuddin *et al.*, 2016). Estos biocombustibles se producen utilizando tecnologías maduras comercialmente y representan aproximadamente el 90% de los biocombustibles secundarios a nivel mundial (Trninić *et al.*, 2023). La segunda generación (2G) utiliza biomasa lignocelulósica o residual, permitiendo la revalorización de subproductos de otros procesos productivos. Estas biomasa no compiten con fuentes de alimento y suelen tener un bajo costo. Sin embargo, su procesamiento es más complicado debido a su estructura compleja. La tercera generación (3G) utiliza algas, especialmente microalgas, como materia prima. Las microalgas tienen ventajas como una rápida tasa de crecimiento y alta eficiencia fotosintética, y no requieren suelo, pudiendo cultivarse en efluentes residuales o con bajo contenido de nutrientes (Borowitzka y Moheimani, 2013), pero la tecnología para su transformación aún no está completamente desarrollada.

Producción de biocombustibles secundarios

Para la producción de biocombustibles existen diversos procesos que pueden ser englobados en procesos bioquímicos, termoquímicos y otros. Aunque en este trabajo se abordan todas las tecnologías mencionadas en la Figura 1, se enfoca principalmente en procesos termoquímicos.

Los métodos bioquímicos se caracterizan por el uso de microorganismos para la transformación de la biomasa. En el caso de la digestión el producto principal es el biogás, en tanto que en la fermentación el producto principal son los alcoholes. Durante la fermentación, los azúcares de la biomasa son convertidos en bioetanol con la ayuda de levaduras. En el caso de los materiales lignocelulósicos, que no contienen azúcares

simples, es necesario realizar un pretratamiento de hidrólisis, ya sea ácida, enzimática o hidrotérmica, para degradar la celulosa y la hemicelulosa en azúcares simples que puedan ser fermentados por las levaduras (Gonçalves *et al.*, 2016). Mientras que en la digestión diversos microorganismos descomponen la materia orgánica para producir calor, un digestato sólido y gases, que puede ser dióxido de carbono si la digestión se lleva a cabo en presencia de oxígeno, o una mezcla de dióxido de carbono (25%-40%) y metano (50%-70%) si la digestión es anaerobia (Li *et al.*, 2019).

En los procesos termoquímicos, la conversión de la biomasa se realiza mediante el uso de calor y, en algunos casos, presión y/o catalizadores. Estos procesos se dividen según la tolerancia al contenido de humedad de la biomasa en procesos secos que utilizan biomasa con bajo o nulo contenido de agua, y húmedos o hidrotérmicos, los cuales se llevan a cabo en un ambiente rico en agua, por tanto, la humedad de la biomasa no es una restricción (Delgado-Plaza *et al.*, 2023).

Entre los métodos secos se encuentra la combustión, gasificación, torrefacción y pirólisis lenta y rápida. En el caso de la gasificación y la pirólisis lenta la biomasa requiere tener un contenido de humedad inferior a 15-20% para que el proceso sea eficiente (Basu, 2013b). Mientras que en la combustión un contenido alto de humedad dificulta el proceso y decrece la recuperación de energía, ya que parte de la energía que proviene de las reacciones de oxidación de la biomasa es utilizada para evaporar el agua.

Los métodos termoquímicos húmedos no requieren proceso de secado de la biomasa, evitando con ello pérdidas energéticas. Se llevan a cabo a temperatura moderada (200 a 700°C) y alta presión (20 a 300 bar), generalmente correspondientes a la presión de vapor del solvente a la temperatura de trabajo (Sigaar, 2014). Según sea el rango de temperatura y

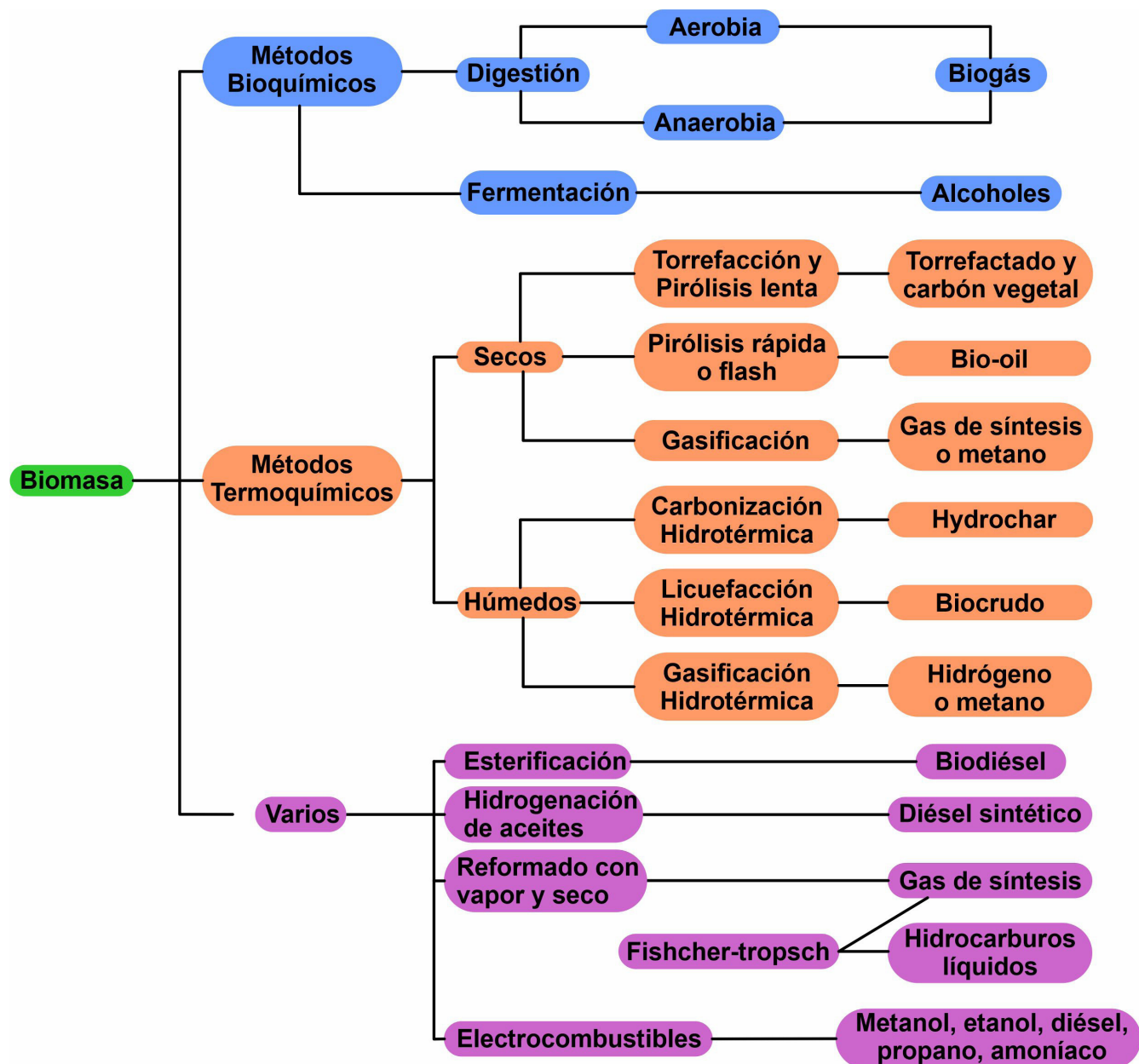


Figura 1. Procesos de producción de biocombustibles.

presión utilizado, se favorecerá el rendimiento de una fase en los productos, llamándose gasificación cuando el producto deseado es gas, licuefacción cuando lo que se pretende es obtener un líquido combustible o carbonización cuando el objetivo es la fase sólida carbonosa.

En este apartado se detallará la producción de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos mediante procesos termoquímicos.

Biocombustibles sólidos

La torrefacción, la pirólisis lenta y la carbonización hidrotérmica son procesos termoquímicos utilizados para la producción de combustibles sólidos a partir de biomasa, tal como se observa en la Figura 1. Aunque el objetivo de estos procesos es la producción de un sólido carbonoso, se diferencian en las condiciones de reacción, el rendimiento y características del producto. Las principales características de estos procesos se muestran en la Figura 2.

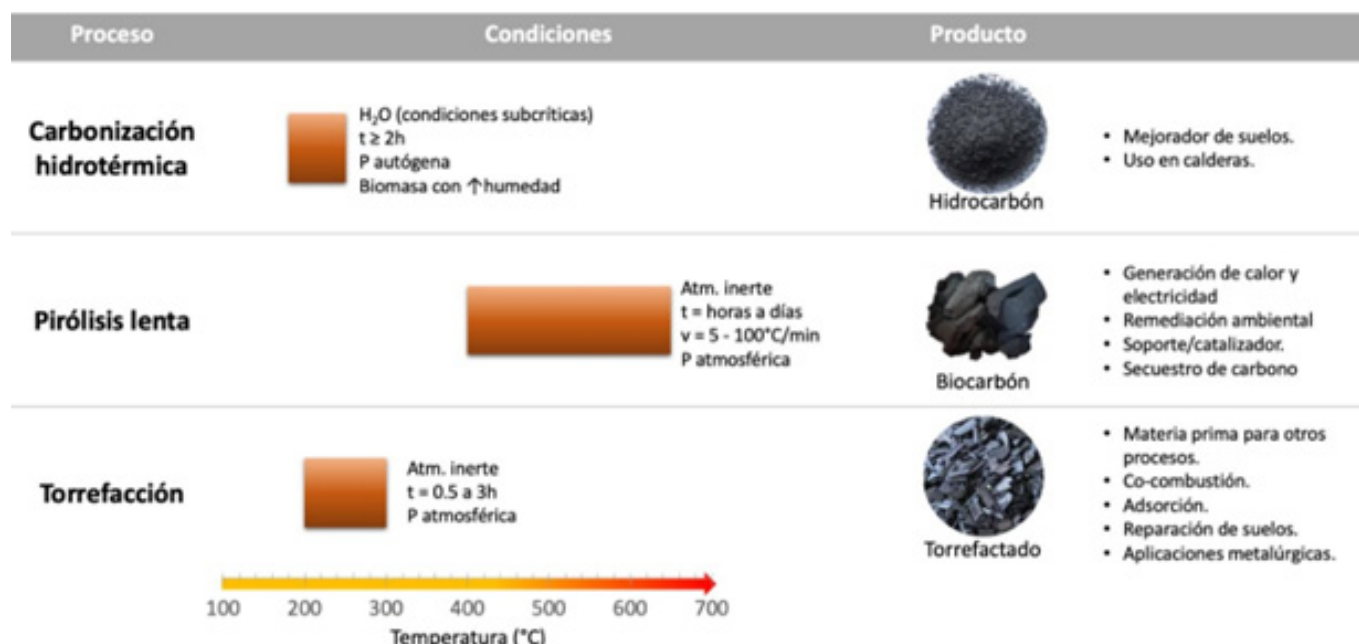


Figura 2. Producción de biocombustibles sólidos. *Atm*: Atmósfera; *t*: Tiempo; *v*: Velocidad; *P*: Presión

Torrefacción

La torrefacción es un método termoquímico seco que ha sido estudiado como pretratamiento de biomasa con el objetivo de obtener un sólido con mejores propiedades combustibles que la biomasa de partida. Durante este proceso, la biomasa se calienta a temperaturas entre 200 y 300 °C, en una atmósfera inerte, durante 0.5 a 3 h (Eling et al., 2024). Bajo estas condiciones se modifican las propiedades de la biomasa: i) se elimina la humedad y parte de los compuestos volátiles, ii) se llevan a cabo reacciones de deshidroxilación obteniendo un producto más hidrófobo que la biomasa de partida, iii) la hemicelulosa se degrada a través de reacciones de fragmentación, desacetilación y despolimerización, lo que produce compuestos volátiles y carbón fijo, iv) la lignina y la celulosa se desvolatilizan y despolimerizan parcialmente y v) se destruye por completo la estructura celular perdiendo la naturaleza fibrosa del material (Butler et al., 2023).

El resultado es un material seco e hidrofóbico, conocido como torrefactado, con mayor

contenido de carbono, mayor poder calorífico y más fácil de moler en comparación con la biomasa de partida (Butler et al., 2023; Eling et al., 2024). El torrefactado presenta características intermedias entre una biomasa convencional y un carbón vegetal (Yuzhuo Wang y Wu, 2023) y sus rendimientos máxicos dependen de la biomasa de partida y las condiciones de reacción, rondando 70-85% (Bustamante García et al., 2016).

La disminución en el contenido de humedad y el carácter hidrofóbico del torrefactado reducen los costos asociados a su manejo, transporte y almacenamiento, ya que disminuye la carga de agua que se transporta y mitiga la degradación microbológica. Por otro lado, produce materiales más friables, lo que facilita el proceso de molienda, reduciendo el consumo de energía y logrando un tamaño de partícula más uniforme (Ribeiro Nunes et al., 2018). Este material puede ser alimentado a otros procesos, como la gasificación, y tiene numerosas áreas de aplicación, como co-combustión, adsorción, reparación de suelos y aplicaciones metalúrgicas (Eling et al., 2024).

Pirólisis lenta o convencional

Al aumentar la temperatura de trabajo respecto a la de torrefacción el proceso se conoce como pirólisis. La pirólisis se clasifica en lenta, rápida y *flash* según la velocidad de calentamiento, la temperatura del proceso y el tiempo de residencia. Cada condición favorece la producción de un compuesto específico: en la pirólisis lenta se produce principalmente biocarbón o carbón vegetal, mientras que en las pirólisis rápida y *flash* se favorece la formación de un biocombustible líquido conocido como bio-oil.

En la pirólisis lenta, o pirólisis convencional, la materia orgánica se calienta gradualmente en un ambiente carente de oxígeno a temperaturas entre los 400 y 650 °C, con velocidades de calentamiento entre los 5 a 100 °C/min y tiempos de residencia que pueden ir de horas a varios días (Mukherjee et al., 2022). La combinación de bajas velocidades de calentamiento, temperaturas moderadas y largos tiempos de residencia resulta en un mayor rendimiento de biocarbón de alta calidad, mientras se minimiza la producción de bio-oil y gases (Al-Rumaihi et al., 2022).

La pirólisis es un proceso complejo que sigue dos mecanismos principales: primario y secundario. En el mecanismo primario, que ocurre alrededor de los 250 a 300 °C, se rompen los enlaces químicos de la biomasa liberando compuestos volátiles que luego participan en reacciones adicionales en el mecanismo secundario. El mecanismo secundario ocurre a temperaturas más elevadas, generalmente por encima de los 300 °C. A esta temperatura los compuestos inestables se rompen o se recombinan para formar nuevas estructuras moleculares (Al-Rumaihi et al., 2022).

La biomasa lignocelulósica es el material más utilizado como insumo en la pirólisis. El componente de esta biomasa que tiene menor estabilidad térmica es la hemicelulosa debido a su baja cristalinidad; se descompone entre 150

y 350 °C, produciendo principalmente gases no condensables y alquitranes (Demirbas, 2011). La celulosa se descompone entre los 270 y 350 °C produciendo compuestos orgánicos volátiles condensables, pudiendo también formar fase sólida (Ma et al., 2019). La lignina es el componente más estable y se descompone entre los 250 y 500 °C (Basu, 2013b); produce fenoles mediante reacciones de escisión de éteres y C-C, y contribuye en gran medida a la formación de la fase sólida (Bridgwater y Peacocke, 2000; Ribeiro Nunes et al., 2018). Tanto la descomposición de la hemicelulosa como la de la lignina son procesos exotérmicos y se asocian con la formación de biocarbón. En contraste, la descomposición de la celulosa es un proceso endotérmico debido a las rápidas reacciones de desvolatilización (Bridgwater y Peacocke, 2000).

Los compuestos inorgánicos presentes en la biomasa pueden actuar como catalizadores de la pirólisis. Se ha reportado que los metales alcalinos y alcalinotérreos, como K, Ca, Na y Mg mejoran la deshidratación de los azúcares, ya que catalizan la ruptura de los enlaces C-H y C-O. El K disminuye la temperatura a la que inicia la descomposición de la biomasa y aumenta el rendimiento del sólido, el agua y el gas debido a que favorece la despolimerización y fragmentación de la biomasa hacia compuestos más pequeños. Por su parte la presencia de KCl y NaCl aceleran la descomposición térmica de los carbohidratos a moléculas pequeñas por lo que se favorece la fase gaseosa a expensas del bio-oil (Demirbas, 2011).

El biocarbón obtenido por pirólisis muestra una alta estabilidad térmica y un mayor poder calorífico superior (PCS), en comparación con la biomasa original, debido al incremento en su contenido de carbón. El PCS puede variar según la materia prima y las condiciones de pirólisis, pero generalmente se encuentra entre 15 y 25 MJ/kg (Mukherjee et al., 2022). Estas características hacen que el biocarbón sea adecuado como combustible en sistemas de generación de calor y

como co-combustible para producir electricidad. Además de su uso como biocombustible, el biocarbón tiene múltiples aplicaciones que van desde la remediación del suelo y el agua, mejora del rendimiento agrícola, supercondensadores, celdas de combustible, soporte/catalizadores y el secuestro de carbono (Al-Rumaihi et al., 2022).

Carbonización hidrotérmica

Para la obtención de biocombustibles sólidos a partir de biomasa con alto contenido de humedad, como la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, es aconsejable utilizar la carbonización hidrotérmica (CHT). Este proceso evita las pérdidas energéticas asociadas con el secado de la biomasa.

La CHT es un proceso hidrotérmico que se lleva a cabo en un ambiente acuoso a temperaturas que oscilan entre 180 y 250 °C, a presiones comúnmente autógenas por el vapor de agua, y durante tiempos de reacción que van de 2 a varias horas (Wang et al., 2018). El proceso se realiza a condiciones de presión y temperatura correspondientes al agua subcrítica, facilitando la deshidratación, desoxigenación y policondensación de los componentes de la biomasa, lo que conduce a la formación de un sólido carbonoso, conocido como hidrocarbón o hydrochar (Wang et al., 2018).

La CHT de biomasa lignocelulósica sigue dos mecanismos. Por un lado, los componentes de la biomasa termodinámicamente inestables se disuelven en el medio y posteriormente reaccionan en fase líquida para formar el hidrocarbón mediante reacciones de condensación y repolimerización (Al-Rumaihi et al., 2022; Demirbas, 2011). Por otro lado, si las condiciones del proceso no son lo suficientemente severas para hidrolizar la biomasa, los componentes no se disolverán y sufrirán un proceso similar a la pirólisis, produciendo especies carbonosas que se deshidratarán y reordenarán en una estructura

carbonosa rica en aromáticos y furanos (Wang et al., 2018). El tiempo de residencia y la temperatura determinan la severidad de la reacción y el grado de carbonización de la biomasa de partida.

El hidrocarbón obtenido por CHT presenta características interesantes: i) Posee un PCS similar al lignito, pero se diferencia de este por un mayor contenido de compuestos volátiles y mejor biodegradabilidad en el suelo, lo que le confiere propiedades atractivas como mejorador de suelos (Kruse y Dahmen, 2015). ii) Sus propiedades hidrofóbicas facilitan la eliminación de agua por prensado (Wang et al., 2018) iii) En algunos casos presenta un bajo contenido de sales, las cuales quedan disueltas en la fase líquida, esto permite utilizarlo en calderas con temperaturas cercanas a los 1200 °C (Kruse y Dahmen, 2015).

Biocombustibles líquidos

Los procesos termoquímicos utilizados para la producción de combustibles líquidos a partir de biomasa son la pirólisis, tanto rápida como *flash*, y la licuefacción hidrotérmica. Las condiciones en las que se lleva a cabo estos procesos y las características de los productos se encuentran en la Figura 3.

Pirólisis rápida y pirólisis *flash*

Pirólisis rápida y pirólisis *flash* son términos que a menudo se utilizan indistintamente, pero tienen algunas diferencias en las condiciones del proceso y la distribución de los productos obtenidos. Aunque ambas tienen como producto objetivo un líquido viscoso de color marrón oscuro y olor acre conocido como bio-oil o aceite piroleñoso.

La pirólisis rápida se lleva a cabo a temperaturas en torno a los 500 °C, en ausencia de oxígeno con tiempos de residencia de algunos segundos, aproximadamente 10 a 30 s (Bridgwater y Peacocke, 2000). Durante este proceso la materia orgánica se degrada obteniendo una distribución

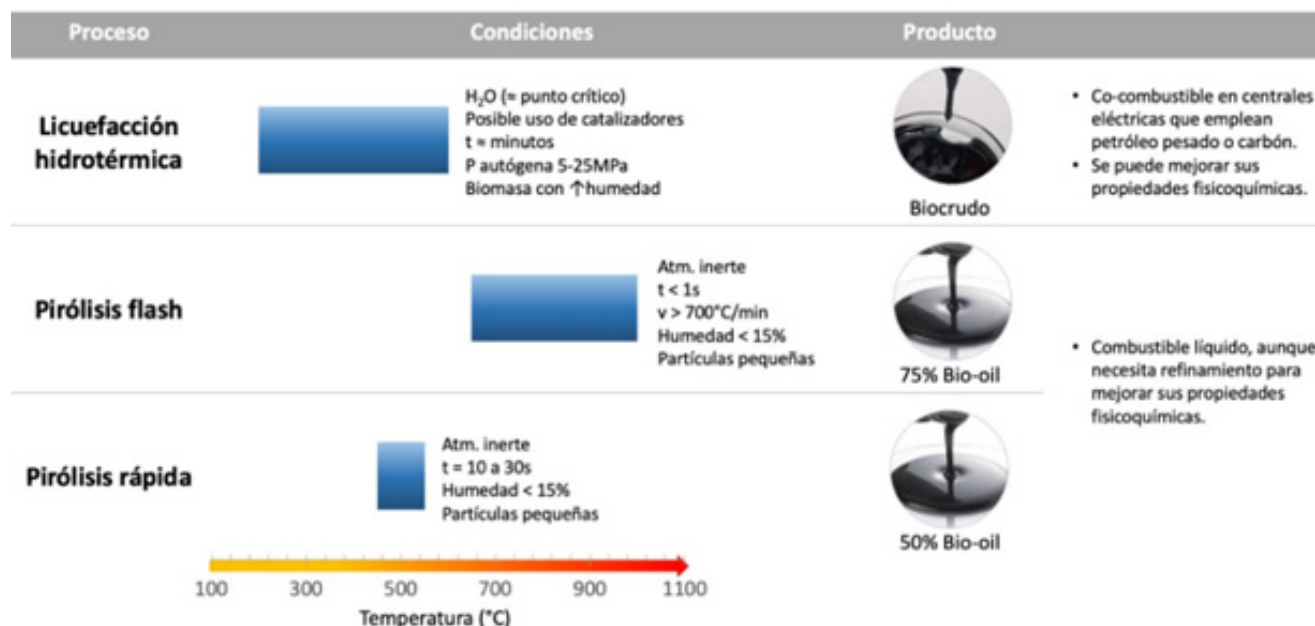


Figura 3. Producción de biocombustibles líquidos. *Atm*: Atmósfera; *t*: Tiempo; *v*: Velocidad; *P*: Presión

de productos de aproximadamente 25% de sólidos, 50% de líquidos condensables (bio-oil) y 25% de gases (Bridgwater, 2012).

La pirólisis *flash* debe su nombre a la extrema rapidez del proceso. Se lleva a cabo a temperaturas entre 650-1000 °C, con velocidades de calentamiento superiores a 700 °C/segundo y tiempos de residencia extremadamente cortos (menos de 1 segundo). Durante este proceso, la elevada tasa de calentamiento de la biomasa y el rápido enfriamiento de los productos favorecen la producción del bio-oil, obteniendo una distribución de productos aproximada de 12% de sólidos, 75% de líquidos condensables (bio-oil) y 13% de gases (Banks y Bridgwater, 2016). Se ha observado que el aumento de la temperatura tiene un efecto positivo en el rendimiento de bio-oil. Sin embargo, a temperaturas mayores a la óptima se favorecen reacciones secundarias, como el craqueo de los compuestos volátiles, lo que puede aumentar el rendimiento de gas (Guedes et al., 2017).

Un parámetro clave es el tamaño de las partículas de biomasa. Se suelen utilizar partículas pequeñas para minimizar el gradiente de temperatura entre la superficie y el centro de la partícula. La alta velocidad de transferencia de calor es esencial para que la partícula alcance la temperatura deseada en fracciones de segundo, favoreciendo así un alto rendimiento de líquido y reduciendo la formación de coque (Al-Rumaihi et al., 2022). Además, es necesario que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 15% (Bridgwater, 2012).

A pesar de la posibilidad de obtener altos rendimientos de bio-oil, este es inadecuado para aplicaciones directas. Su alto contenido de oxígeno y agua resulta en un poder calorífico bajo (17 MJ/kg), aproximadamente la mitad del de los combustibles derivados del petróleo (42-44 MJ/kg) (Bridgwater y Peacocke, 2000). Además, contiene ácidos que causan corrosión en los equipos. Por lo tanto, el bio-oil requiere refinamiento para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y ser una alternativa viable a los combustibles derivados del petróleo.

Licuefacción hidrotérmica

Para la producción de biocombustibles líquidos a partir de biomasa con alto contenido de humedad, una alternativa prometedora es la licuefacción hidrotérmica (LHT). Este proceso hidrotérmico se realiza en un medio acuoso, eliminando la necesidad de secar la biomasa previamente.

Durante este proceso, la mezcla de biomasa y agua y/o solvente orgánico se calienta a temperaturas en torno a 200-600 °C y presiones comúnmente autogeneradas por la presión de vapor del agua/solvente a la temperatura de trabajo que rondan 5-25 MPa y con tiempos de residencia en el orden de minutos (Smith y Keener, 2011). Su objetivo principal es la producción de un líquido oleoso conocido como biocrudo, aunque también se obtienen una fase sólida llamada hydrochar o hidrocarbón y gases. La distribución de los productos y sus características dependen de los parámetros del proceso, como el tipo de biomasa, la temperatura de reacción, el tiempo de residencia, el solvente y el catalizador utilizado.

Las reacciones que sufre la biomasa en la LHT son diferentes a las que sufre en los métodos termoquímicos secos debido al cambio de las propiedades fisicoquímicas del agua cerca del punto crítico. La ruta de reacción de la biomasa durante la LHT se puede dividir en tres etapas: despolimerización, descomposición de monómeros y recombinación de subproductos (Gollakota *et al.*, 2018).

El proceso de despolimerización de la biomasa comienza con la dispersión de los fragmentos de biomasa solubles en agua a aproximadamente 100°C, seguida por la hidrólisis de los biopolímeros en oligómeros solubles en agua alrededor de 150°C. Posteriormente, la ruptura de los puentes de hidrógeno intra e intermoleculares (Ruiz *et al.*, 2013) provoca la desintegración de la celulosa y la hemicelulosa en monómeros simples como

glucosa, furfural o ácido acético (Zhang, 2010), formándose un lodo a temperaturas cercanas a 200°C y 1 MPa de presión (Kumar *et al.*, 2018).

Durante la descomposición, las moléculas pierden agua por deshidratación y CO₂ por descarboxilación, promoviendo la eliminación de átomos de oxígeno de los productos del proceso. En una primera fase, se forman compuestos orgánicos solubles en agua como ácidos orgánicos, furanos, aldehídos y fenoles. Estos compuestos intermediarios repolimerizan para formar biocrudo, que está compuesto por ácidos, alcoholes, aldehídos, ésteres, cetonas, fenoles y otros compuestos aromáticos (Gollakota *et al.*, 2018). Otros compuestos orgánicos solubles forman clústeres aromáticos mediante condensación o polimerización, seguidos de aromatización, deshidratación intramolecular o tautomerismo ceto-enol. Si estos clústers alcanzan la supersaturación, comienza la nucleación de compuestos aromáticos y luego el crecimiento de cristales a partir de los grupos oxigenados presentes, formando microesferas de hydrochar.

El uso de catalizadores mejora el rendimiento del biocrudo al evitar la repolimerización de compuestos fenólicos de bajo peso molecular, lo que reduce la formación de una fase sólida (Kang *et al.*, 2013). Las sales de potasio, especialmente el K₂CO₃, son los catalizadores que producen mayor rendimiento de biocrudo (Yun Wang *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2014), con el siguiente orden de reactividad: K₂CO₃ > KOH > Na₂CO₃ > NaOH (Demirbas, 2011).

El biocrudo obtenido es un líquido de alta viscosidad, con un PCS de 30-36 MJ/kg, un contenido de agua aproximado del 5% y un contenido de oxígeno que oscila entre el 10% y el 20% (Pavlovic *et al.*, 2013). Puede utilizarse directamente como co-combustible en centrales eléctricas que emplean petróleo pesado o carbón. Sin embargo, también puede mejorarse mediante varios procesos diseñados para

reducir su viscosidad, disminuir su contenido de oxígeno y garantizar su estabilidad a largo plazo. Estas técnicas incluyen hidrotratamiento, hidrocrackeo, reacciones con fluidos sub/super críticos, adición de solventes o emulsión con combustibles derivados del petróleo (Xiu & Shahbazi, 2012).

La LHT ofrece varias ventajas para el tratamiento de biomasa residuales y la producción de biocombustibles: elimina la necesidad de secado al utilizar agua en el medio de reacción, permite la producción de una amplia variedad de productos químicos, mejora la velocidad de reacción al operar en condiciones cercanas al punto crítico del agua y asegura la eliminación de patógenos, garantizando materiales libres de compuestos biológicamente activos.

Biocombustibles gaseosos

Para la producción de biocombustibles gaseosos mediante métodos termoquímicos, se puede emplear la gasificación, que puede ser seca o hidrotérmica. Las condiciones del proceso, así como el uso de catalizadores específicos, dependen del tipo de gas combustible que se

desea obtener. En la Figura 4 se presentan las principales características de estos procesos.

Gasificación seca

La gasificación es un proceso termoquímico endotérmico que convierte la biomasa en un gas combustible compuesto principalmente de CH_4 , CO , H_2 y CO_2 . Se lleva a cabo a altas temperaturas, entre 800 y 1200 °C, en un ambiente deficiente de oxígeno. Los agentes oxidantes comúnmente utilizados son oxígeno, aire y/o vapor de agua. Sin embargo, al emplear aire como agente oxidante, surge el problema de la dilución de los gases de reacción debido a que el 79% del aire es nitrógeno, lo que disminuye el poder calorífico de la mezcla o aumenta los costos debido a su posterior separación.

La temperatura de reacción es un factor crucial que influye significativamente en la distribución de productos y en la eficiencia del proceso. A medida que aumenta la temperatura, se favorecen las reacciones de craqueo debido a su naturaleza endotérmica, lo que reduce la formación de alquitranes y promueve la producción de H_2 , CO y CO_2 . Por encima de

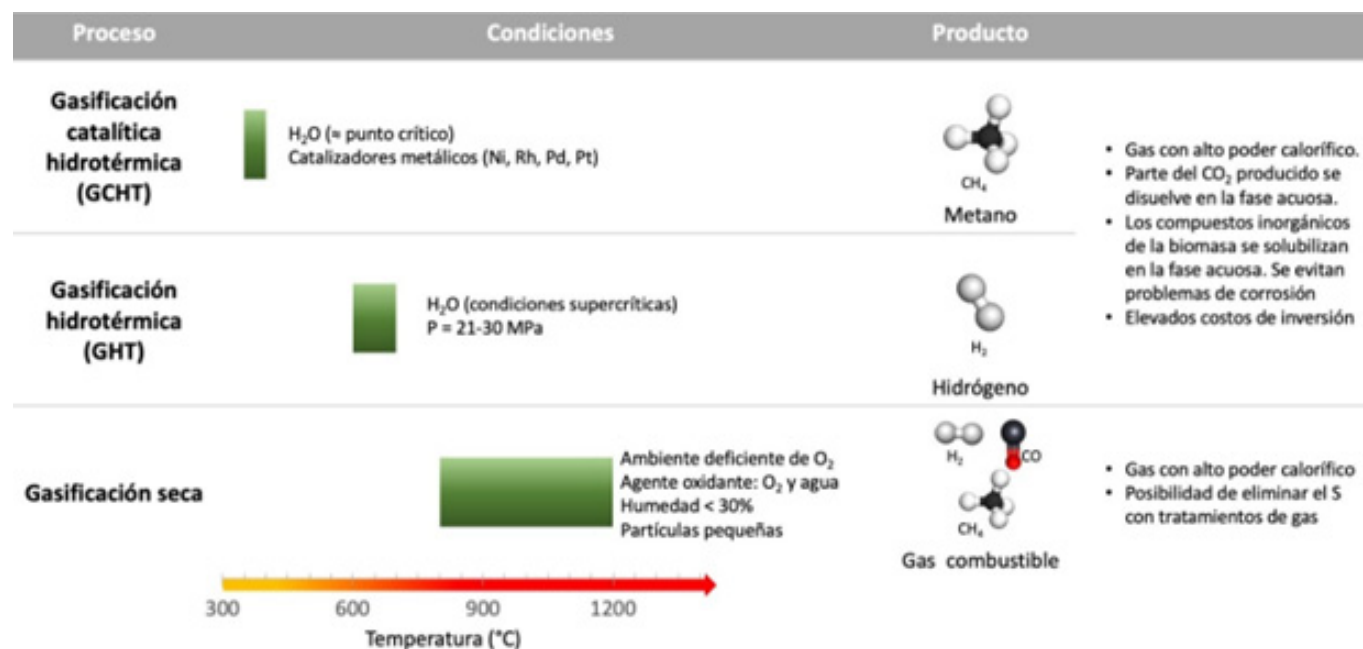


Figura 4. Producción de biocombustibles gaseosos. P: Presión

los 600°C, ocurre la descomposición del CH₄, también una reacción endotérmica lo que, en conjunto con el reformado, incrementa la producción de H₂ (Sansaniwal *et al.*, 2017).

El grado de gasificación suele ser influenciado por el tamaño de las partículas debido a problemas difusivos. Con el incremento del tamaño de las partículas, se amplía el gradiente térmico entre la superficie y el interior, lo que hace que el control de la transferencia de calor y masa prevalezca sobre la cinética de la reacción. Partículas grandes propician la formación de alquitranes pesados y carbón (Basu, 2013a).

El contenido de humedad de la biomasa es crucial en el proceso de gasificación, ya que un alto contenido de humedad disminuye la eficiencia de conversión. Por lo tanto, se prefiere realizar este proceso con biomasa que tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Cuando la biomasa contiene demasiada agua, parte de la energía suministrada se utiliza para evaporar el exceso de humedad (Basu, 2013a). Este consumo energético reduce la temperatura alcanzada en la zona de oxidación, lo que resulta en un craqueo incompleto de los hidrocarburos producidos en la zona pirolítica.

La gasificación de biomasa tiene varios objetivos, por un lado, aumentar el poder calorífico del gas combustible producido al reducir compuestos no combustibles como agua o cenizas. Al gasificar biomasa con alto contenido de azufre es posible eliminarlo en fase gaseosa mediante tratamientos posteriores. También es de interés la producción del gas de síntesis para aplicaciones en celdas de combustible, la producción de combustibles líquidos por Fischer-Tropsch u otros productos químicos y la generación de H₂ como producto específico.

Gasificación húmeda

Una alternativa a la gasificación seca es la gasificación hidrotérmica (GHT) o la gasificación

catalítica hidrotérmica (GCHT). La primera tiene como objetivo la producción de H₂ mientras que la segunda la producción de CH₄.

La GHT se lleva a cabo en condiciones supercríticas del agua, en un rango de temperaturas de 600-700 °C y presiones elevadas (21-30 MPa) (Kruse & Dahmen, 2015). Mientras que la GCHT se lleva a cabo en condiciones cercanas al punto crítico del agua, empleando catalizadores metálicos, entre los cuales se destacan aquellos con fase activa de Ni, Rh, Pd o Pt (Kruse, 2009; Kruse & Dahmen, 2018).

Bajo estas condiciones operativas, la biomasa se descompone en sus componentes básicos. Durante el proceso, se llevan a cabo varias reacciones incluyendo hidrólisis, despolimerización, reformado con vapor, deshidratación y gasificación. El resultado es la producción de un gas combustible compuesto principalmente de H₂, CO, CH₄ y CO₂, con pequeñas cantidades de otros gases, compuestos solubles en agua y bajos rendimientos de hydrochar.

La producción de CO₂ en la GHT y GCHT se debe al alto contenido de oxígeno de la biomasa. Sin embargo, a diferencia de la gasificación seca, parte del CO₂ se disuelve en el agua debido a su alta solubilidad. Esto hace que la fase gaseosa, que es recuperada aún presurizada, contenga relativamente poco CO₂, resultando en un gas con alto poder calorífico (Kruse, 2009). La obtención de una fase gaseosa con esta característica ya presurizada elimina la necesidad de etapas adicionales de acondicionamiento del gas para su almacenamiento, distribución y uso, reduciendo así los costos asociados.

Por otro lado, los compuestos inorgánicos provenientes de la biomasa, como los cloruros, se recuperan solubilizados en la fase acuosa, evitando así los problemas de corrosión que ocurren cuando estos compuestos están presentes en la fase gaseosa. Esto también

reduce los costos de limpieza y mantenimiento durante el procesamiento.

El principal inconveniente de la GHT y la GCHT son los elevados costes de inversión en equipamiento debido a la alta presión requerida. Esto es especialmente relevante en la GHT, que necesita el uso de materiales especiales capaces de soportar la combinación de alta presión y temperaturas de 600 °C o superiores.

Tecnologías varias

Además de los procesos bioquímicos y termoquímicos, existen otros procesos para la producción de biocombustibles. Algunas de estas tecnologías han alcanzado un alto grado de madurez, como la esterificación de ácidos grasos para la producción de biodiesel, mientras que otras se encuentran en fase emergente, como la producción de biocombustibles líquidos por Fischer-Tropsch o los electrocombustibles.

El reformado seco o con vapor de compuestos orgánicos y el proceso Fischer-Tropsch son métodos que permiten producir combustibles a partir de diversas fuentes de carbono. Por un lado, el reformado permite obtener gas de síntesis a partir de derivados de biomasa (Musso et al., 2024), que es una mezcla principalmente de H_2 + CO . Este gas puede ser utilizado directamente en celdas de combustible para la producción de electricidad o transformarlo mediante el proceso de Fischer-Tropsch en combustible líquido con características adecuadas para su uso en los motores de combustión interna.

Los electrocombustibles o e-combustibles son producidos utilizando H_2 y CO_2 o N_2 como materia prima. El CO_2 puede obtenerse de la producción de biocombustibles o capturarse del aire o de fuentes puntuales, mientras que el nitrógeno se captura del aire. La particularidad de estos combustibles es que el hidrógeno utilizado para su síntesis proviene de la electrolisis del agua utilizando electricidad renovable, por lo que son

una alternativa prometedora para aprovechar los picos de producción eléctrica.

Dependiendo de la tecnología de producción, se puede sintetizar químicamente una variedad de electrocombustibles líquidos y gaseosos, incluidos electrometano, electrometanol, electrogasolina, electrodiésel, electrocombustible para aviones y electroamoníaco (Brynnolf et al., 2022). Esta tecnología no es madura y presenta algunos desafíos como la baja eficiencia energética y los altos costos.

Aspectos ambientales, sociales y económicos de la bioenergía

La energía sostenible es un factor crucial para el bienestar socioambiental. La ONU considera la energía como un motor esencial para la reducción de la pobreza, el progreso social, la equidad, la resiliencia y el crecimiento económico (United Nations, 2023), destacando su papel fundamental en la solución de las problemáticas globales actuales. No obstante, el acceso a la energía a nivel mundial no es universal, pues 733 millones de personas no tienen acceso a la electricidad, 675 millones no están conectadas a redes eléctricas y 2300 millones dependen de combustibles peligrosos y contaminantes para cocinar (United Nations, 2023). Esta situación acentúa las brechas sociales.

Por otro lado, el consumo de energía es la principal causa del cambio climático, ya que representa alrededor del 60% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (United Nations, 2023). Para mitigar este problema, es imperativa la transición hacia fuentes de energía renovable, ya que actualmente, las energías renovables solamente representan el 19% del consumo total de energía, casi el 30% del consumo de energía en el sector eléctrico (United Nations, 2023) y 9% en el transporte (International Energy Agency, 2023).

Las energías renovables, como la solar y la eólica, son intermitentes, lo que significa que su producción no es temporalmente estable y depende de las condiciones meteorológicas. Además, sus picos de máxima producción no siempre coinciden con los picos de máxima demanda energética, lo que hace necesarias soluciones de almacenamiento para garantizar la estabilidad del suministro.

En este sentido, se han propuesto diversos sistemas de almacenamiento. Por ejemplo, el bombeo hidráulico permite almacenar grandes cantidades de energía, pero requiere la construcción de represas en zonas elevadas, lo cual conlleva impactos sociales y ambientales significativos. Por otro lado, el uso de baterías, como las de ion-litio, sigue siendo costoso y presenta limitaciones en términos de capacidad y vida útil.

En este marco, la bioenergía proporciona un suministro estable y continuo de energía que puede integrarse con los sistemas de energías renovables intermitentes. Esto permite abastecer energía al sistema durante períodos de alta demanda o de baja producción de energía intermitente, y almacenar energía en forma de biocombustibles durante los picos de producción. Esta integración crea un sistema más robusto y resiliente.

Las plantas de cogeneración de biomasa producen simultáneamente electricidad y calor, lo que permite una utilización más eficiente del recurso energético. Esta capacidad es especialmente relevante en el sector industrial, donde calderas, hornos, secaderos y otros procesos pueden cubrir sus necesidades energéticas con un rendimiento energético que alcanza entre el 80% y el 90% (Ballesteros, 2018). Asimismo, facilita la descarbonización de la producción de calor de alta temperatura.

Además de la biomasa, es factible emplear en estas infraestructuras biocombustibles como

pellets de biocarbón o torrefactados, bio-oil o biocrudo, así como gases combustibles. El uso de estos materiales no solo permite descentralizar la producción de energía respecto a la fuente de biomasa, sino también su implementación en otros sectores como el transporte pesado y marítimo.

La producción de biocombustibles líquidos, sólidos y gaseosos mediante procesos termoquímicos es clave para diversificar las fuentes de energía renovable y aprovechar una amplia gama de biomasa. La distribución de estos biocombustibles depende del proceso empleado, tal como se muestra en la Figura 5, lo que permite adaptarlos a diversas aplicaciones en la infraestructura energética existente, incluyendo el transporte, la generación de calor y electricidad, y la cogeneración. Estos biocombustibles pueden integrarse en la infraestructura energética existente, permitiendo su uso en sectores como el transporte, la generación de calor y electricidad, y la cogeneración. Los biocombustibles líquidos pueden ser utilizados en motores convencionales y así reducir las emisiones del sector transporte. Los biocombustibles sólidos pueden reemplazar el carbón en sistemas de calefacción y plantas termoeléctricas. Mientras que los gaseosos son adecuados para inyectarse en redes de gas o generar electricidad y calor de forma eficiente.

Desde un punto de vista ambiental, la bioenergía puede contribuir a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero si el modelo de producción de biomasa y biocombustibles es sostenible. Esto se debe a que el CO₂ absorbido por la biomasa durante su crecimiento se libera nuevamente durante la combustión, cerrando así el ciclo del carbono en periodos cortos de tiempo y manteniendo estable su concentración en la atmósfera. Incluso puede generar emisiones netas negativas si es implementado un sistema de bioenergía con captura y almacenamiento de CO₂.

Por otro lado, la producción de bioenergía puede complementar la gestión sostenible de residuos biomásicos procedentes de otros sistemas productivos. Utilizar estos residuos evita la emisión de gases de efecto invernadero que resultaría de su descomposición microbiológica tras su descarte, contribuye a mitigar la contaminación del agua y el suelo al gestionar estas biomásas residuales de manera sostenible. También genera nuevas líneas de negocio a los productores de la biomasa al reincorporarla en la cadena de valor.

Además de su impacto ambiental, la producción de bioenergía genera derrames económicos y sociales favoreciendo una economía descentralizada. En el 2021, se generaron alrededor de 2.5 millones de empleos relacionados con la bioenergía (Renewable Energy Agency, 2023), principalmente en las zonas rurales de los países en desarrollo, ya que

es el lugar donde la biomasa está disponible en mayor medida. Desde una perspectiva social, esta creación de puestos de trabajo contribuye a reducir la migración de habitantes de áreas agrícolas hacia las grandes ciudades y promueve el desarrollo económico en las zonas rurales.

La implementación de la bioenergía es un factor clave para avanzar hacia lo que el Programa de la ONU para el Medio Ambiente (PNUMA) define como Economía Verde. Esta economía busca mejorar el bienestar humano y la equidad social, reduciendo significativamente los riesgos ambientales y las escaseces ecológicas. En su expresión más simple, una Economía Verde puede ser considerada como una que es baja en carbono, eficiente en recursos y socialmente inclusiva (United Nations Environment Programme, 2019). La bioenergía, cuando se produce y utiliza de manera sostenible, cumple plenamente con estos parámetros.

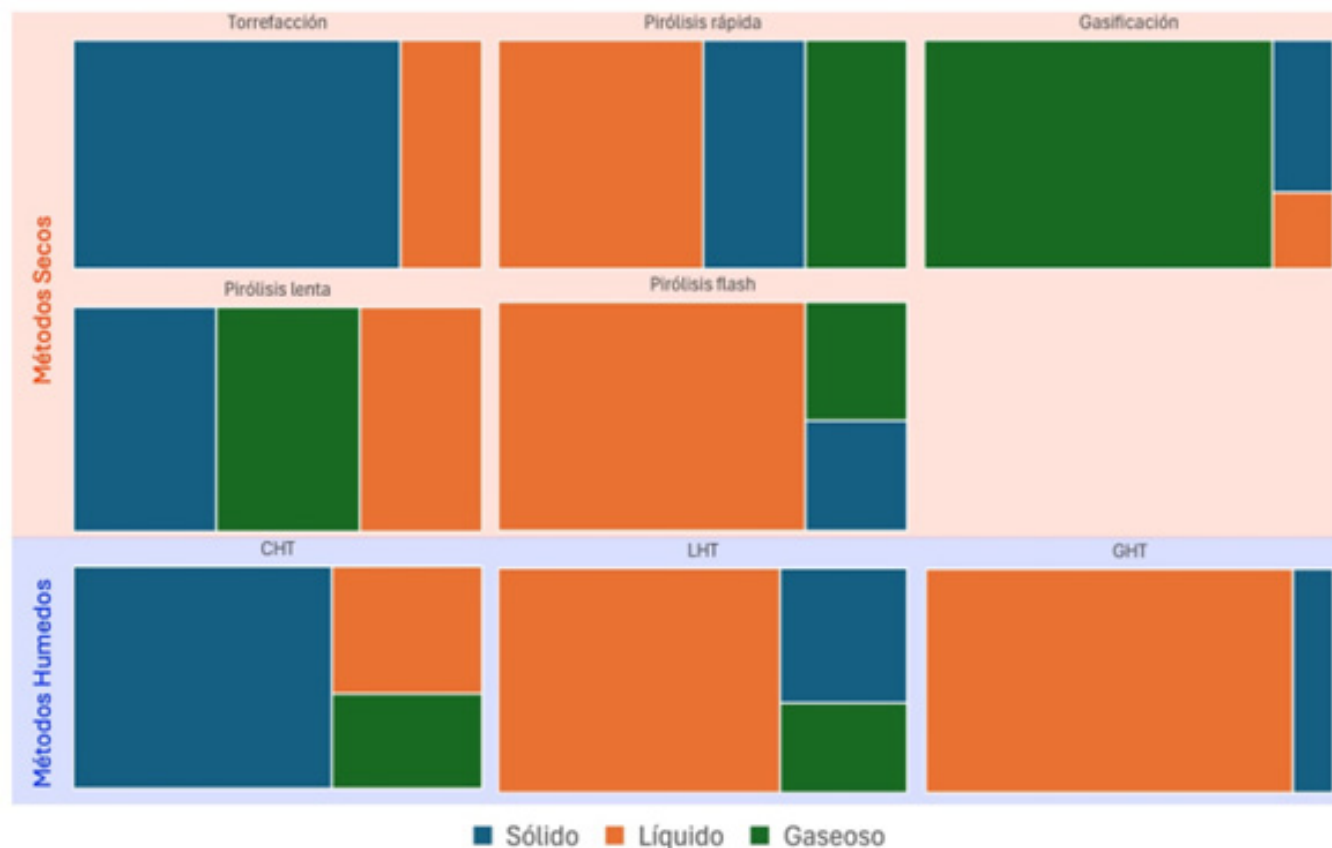


Figura 5. Distribución de los productos obtenidos en los procesos termoquímicos

Conclusiones

La energía desempeña un papel fundamental en el bienestar socioambiental actual, siendo crucial para el desarrollo económico y la calidad de vida de las comunidades. No obstante, el acceso a una energía asequible, segura y no contaminante sigue representando un desafío. La implementación de energías renovables es crucial para mitigar esta problemática. Entre ellas, la bioenergía, se distingue por no depender de fenómenos meteorológicos y tiene la capacidad de integrarse con otras fuentes de energías renovables intermitentes, generando sistemas energéticos robustos y resilientes.

Debido a las características de la biomasa, la producción de biocombustibles secundarios es necesaria para asegurar su estabilidad fisicoquímica en el tiempo y adecuar sus características a los sistemas actuales de uso de combustibles convencionales. La elección de la tecnología óptima dependerá de las características específicas de la biomasa y del tipo de biocombustible requerido.

En un contexto de sostenibilidad, los distintos tipos de bioenergía, como biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, desempeñan un rol esencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir el impacto ambiental.

Por otro lado, el uso de la biomasa para la producción de energía acarrea diversos impactos benéficos tanto ambientales como sociales: la reducción de emisiones netas de gases de efecto invernadero, diversificación de la matriz energética, aumento de empleo en zonas rurales e inversión económica para la implementación de las tecnologías para su transformación, entre otros.

En entornos rurales, la producción y uso de bioenergía puede tener un alto impacto en el entorno. La producción de bioenergía beneficia

directamente a las zonas rurales, donde se concentra la mayor parte de la biomasa disponible para estos procesos. Esto impulsa la generación de empleo en actividades relacionadas con la recolección, procesamiento y transformación de biomasa, y promueve la inversión en infraestructura e inyección de capital en dichas comunidades. Además, este desarrollo no solo mejora las oportunidades económicas, sino que también facilita la diversificación de la matriz energética en territorios urbanos y rurales.

De esta manera, la biomasa se destaca como la única fuente renovable capaz de generar combustibles sólidos, líquidos y gaseosos utilizables en diversos sectores como la producción de calor y electricidad, así como biocombustibles líquidos para el transporte, contribuyendo además a un sistema energético sostenible.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido del Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) y de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) a través del proyecto FCE_3_2022_1_172592. Valoramos profundamente el tiempo y los comentarios del revisor, los cuales han sido de gran ayuda para fortalecer nuestro trabajo.

Referencias

- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H. & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112715. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>
- Ballesteros, M. (2018). El papel de la bioenergía en la nueva bioeconomía. *Mediterráneo económico*, 31.

- Banks, S. W. & Bridgwater, A. V. (2016). Catalytic fast pyrolysis for improved liquid quality. En *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 391–429). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00014-X>
- Basu, P. (2013a). Gasification Theory. En Elsevier (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (Second Edi, pp. 199–248). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396488-5.00007-1>
- Basu, P. (2013b). Introduction. En *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (Second, pp. 1–27). Elsevier.
- Bhaskar, T. & Pandey, A. (2015). Introduction. En *Recent Advances in Thermochemical Conversion of Biomass* (pp. 3–30).
- Borowitzka, M. A. & Moheimani, N. R. (2013). Sustainable biofuels from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1), 13–25. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9271-9>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Bridgwater, A. V. & Peacocke, G. V. C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and sustainable energy reviews*, 4(1), 1–73. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00007-6)
- Brynolf, S., Hansson, J., Anderson, J. E., Skov, I. R., Wallington, T. J., Grahn, M., Korberg, A. D., Malmgren, E. & Taljegård, M. (2022). Review of electrofuel feasibility - Prospects for road, ocean, and air transport. En *Progress in Energy* (Vol. 4, Número 4). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac8097>
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., Hernández Díaz, J. C., Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruíz, J. Á., Corral-Rivas, J. J. & Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(38), 5–23. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000600005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Butler, J. W., Skrivan, W. & Lotfi, S. (2023). Identification of Optimal Binders for Torrefied Biomass Pellets. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 3390, 16(8), 3390. <https://doi.org/10.3390/EN16083390>
- Delgado-Plaza, E., Carrillo, A., Valdés, H., Odobez, N., Peralta-Jaramillo, J., Jaramillo, D., Reinoso-Tigre, J., Nuñez, V., García, J., Reyes-Plascencia, C., Tancredi, N., Gallardo, F., Merino, I., León, G., Torres, J., García, C. & Sosa-Tinoco, I. (2023). Key Processes for the Energy Use of Biomass in Rural Sectors of Latin America. En *Sustainability* (Switzerland) (Vol. 15, Número 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15010169>
- Demirbas, A. (2011). Competitive liquid biofuels from biomass. *Applied Energy*, 88(1), 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.016>
- Eling, J., Okot, D. K., Menya, E. & Atim, M. R. (2024). Densification of raw and torrefied biomass: A review. *Biomass and Bioenergy*, 184, 107210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107210>
- FAO. (2004). Energy Definitions. FAO Departments and Offices. <http://www.fao.org/energy/home/definitions/en/>

- Gollakota, A. R. K., Kishore, N. & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378–1392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>
- Gonçalves, F. A., Ruiz, H. A., Silvino dos Santos, E., Teixeira, J. A. & de Macedo, G. R. (2016). Bioethanol production by *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitis* and *Zymomonas mobilis* from delignified coconut fibre mature and lignin extraction according to biorefinery concept. *Renewable Energy*, 94, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.045>
- Guedes, R. E., Luna, A. S. & Torres, A. R. (2017). Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A Review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 129(July 2017), 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.019>
- Guo, M., Song, W. & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023. www.iea.org/terms
- Kang, S., Li, X., Fan, J. & Chang, J. (2013). Hydrothermal conversion of lignin: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 546–558. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.013>
- Kruse, A. (2009). Hydrothermal biomass gasification. *En Journal of Supercritical Fluids* (Vol. 47, Número 3, pp. 391–399). <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.10.009>
- Kruse, A. & Dahmen, N. (2015). Water - A magic solvent for biomass conversion. *Journal of Supercritical Fluids*, 96, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.09.038>
- Kruse, A. & Dahmen, N. (2018). Hydrothermal biomass conversion: Quo vadis? *The Journal of Supercritical Fluids*, 134, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.12.03>
- Kumar, M., Olajire Oyedun, A. & Kumar, A. (2018). A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1742–1770. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.270>
- Li, Y., Chen, Y. & Wu, J. (2019). Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. *En Applied Energy* (Vol. 240, pp. 120–137). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>
- Ma, Z., Yang, Y., Wu, Y., Xu, J., Peng, H., Liu, X., Zhang, W. & Wang, S. (2019). In-depth comparison of the physicochemical characteristics of bio-char derived from biomass pseudo components: Hemicellulose, cellulose, and lignin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.015>
- Mukherjee, A., Patra, B. R., Podder, J. & Dalai, A. K. (2022). Synthesis of Biochar From Lignocellulosic Biomass for Diverse Industrial Applications and Energy Harvesting: Effects of Pyrolysis Conditions on the Physicochemical Properties of Biochar. *Frontiers in Materials*, 9, 870184. <https://doi.org/10.3389/FMATS.2022.870184>/BIBTEX

- Musso, M., Veiga, S., Perdomo, F., Rodríguez, T., Mazzei, N., Decarlino, B., Portugal, P. & Bussi, J. (2024). Hydrogen production via steam reforming of small organic compounds present in the aqueous fraction of bio-oil over Ni-La-Me catalysts (Me = Ce, Ti, Zr). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(2), 2421–2437. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02296-x>
- NASA. (2024). Dióxido de Carbono. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?intent=111>
- Pavlovic, I., Knez, Z. & Skerget, M. (2013). Hydrothermal Reactions of Agricultural and Food Processing Wastes in Sub- and Supercritical Water: A Review of Fundamentals, Mechanisms, and State of Research. *Jurnal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, 8003–8025.
- Renewable Energy Agency, I. (2023). Renewable energy and jobs: Annual review 2023. www.irena.org
- Ribeiro Nunes, L. J., de Oliveira Matias, J. C. & da Silva Catalao, J. P. (2018). Introduction. En *Torrefaction of Biomass for Energy Applications* (pp. 1–43). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04530-0>
- Ruiz, H. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Fernandes, B. D., Vicente, A. A. & Teixeira, J. A. (2013). Hydrothermal processing, as an alternative for upgrading agriculture residues and marine biomass according to the biorefinery concept: A review. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 21, pp. 35–51). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.069>
- Sansaniwal, S. K., Rosen, M. A. & Tyagi, S. K. (2017). Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.215>
- Sigaar, C. (2014). Hydrothermal liquefaction of waste biomass. Optimizing reaction parameters. [Tesis de doctorado]. Aarhus University.
- Smith, M. & Keener, H. (2011). Hydrothermal Liquefaction. *Manure Processing Technologies*, 1–10.
- Tajuddin, N. A., Lee, A. F. & Wilson, K. (2016). Production of biodiesel via catalytic upgrading and refining of sustainable oleaginous feedstocks. En *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies: Second Edition* (pp. 121–164). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00006-0>
- Trninić, M., Dalkılıç, K., Yangın-Gömeç, Ç., Sinisgalli, E., Attard, G., Gargiulo, V., Vučurović, V., Bajić, B. & Striugas, N. (2023). Waste biorefinery technologies for accelerating sustainable energy processes (WIRE).
- United Nations. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf
- United Nations Environment Programme. (2019). La Alianza del Pacífico y el Medio Ambiente: Hacia un modelo de Desarrollo Sostenible basado en el Crecimiento Verde. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/29026>

Wang, T., Zhai, Y., Zhu, Y., Li, C. & Zeng, G. (2018). A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 223–247. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.03.071>

Manuscrito recibido: 9 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 11 de noviembre de 2024

Manuscrito aceptado: 19 de noviembre de 2024

Wang, Yun, Wang, H., Lin, H., Zheng, Y., Zhao, J., Pelletier, A. & Li, K. (2013). Effects of solvents and catalysts in liquefaction of pinewood sawdust for the production of bio-oils. *Biomass and Bioenergy*, 59, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.022>

Wang, Yuzhuo & Wu, J. J. (2023). Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113754. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113754>

World Bioenergy Association. (2016). *Global Biomass Potential Towards 2035*.

Xiu, S. & Shahbazi, A. (2012). Bio-oil production and upgrading research: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4406–4414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.028>

Zhang, Y. (2010). Hydrothermal Liquefaction to Convert Biomass into Crude Oil. En H. Blaschek, T. Ezeji & S. Jürge (Eds.), *Biofuels from Agricultural Wastes and Byproducts* (pp. 201–232). Blackwell.

Zhu, Z., Toor, S. S., Rosendahl, L. & Chen, G. (2014). Analysis of Product Distribution and Characteristics in Hydrothermal Liquefaction of Barley Straw in Subcritical and Supercritical Water. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(3), 737–743. <https://doi.org/10.1002/ep.11977>

Implicaciones de la Integración de Energías Renovables Intermitentes a la Red Eléctrica

Ian Sosa Tinoco*, Clarissa Acosta Campas; Gustavo Nieves Monarrez; Melissa Navarro Robles;

Mario Suzuki Valenzuela.

Instituto Tecnológico de Sonora, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,

Antonio Caso S/N Col. Villa ITSON, Ciudad Obregón, Sonora, Mexico

*ian.sosa@itson.edu.mx

Resumen

Este trabajo aborda las implicaciones de integrar energías renovables intermitentes (ERI), como la solar y eólica en las redes eléctricas. Estas energías ofrecen beneficios significativos, incluyendo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la diversificación de la matriz energética y el impulso a la innovación tecnológica. Sin embargo, presentan desafíos como la intermitencia y variabilidad en la generación, la necesidad de ampliar la infraestructura eléctrica y los impactos en la estabilidad de la red. Para enfrentar estos desafíos, se proponen varias estrategias. La gestión de la producción y la demanda por medio de pronósticos es crucial para equilibrar la oferta y la demanda de energía, reduciendo la necesidad de costosos sistemas de almacenamiento. El desarrollo de tecnologías de almacenamiento avanzadas, como baterías de ion-litio y almacenamiento hidroeléctrico, es esencial para mitigar la intermitencia de las ERI y mejorar la estabilidad de la red. Además, las consideraciones políticas y económicas juegan un papel fundamental en la integración de las ERI, así mismo se destacan diversos incentivos fiscales y financieros implementados en América Latina y el Caribe para fomentar la inversión en energías renovables y tecnologías de almacenamiento. Se observa que la adaptación de los marcos regulatorios es primordial para promover la participación equitativa de las ERI y garantizar la seguridad del suministro eléctrico.

Palabras clave: Energías renovables intermitentes; red eléctrica inteligente; gestión de la demanda; gestión de la producción; pronósticos energéticos

Abstract

This article discusses the implications of integrating intermittent renewable energies (IREs), such as solar and wind, into electricity grids. These energies offer significant benefits, including the reduction of greenhouse gas emissions, the diversification of the energy matrix and the promotion of technological innovation. However, they present challenges such as intermittence and variability in generation, the need to expand electrical infrastructure and impacts on grid stability. To address these challenges, several strategies are proposed. Production and demand management through forecasting is crucial to balance energy supply and demand, reducing the need for costly storage systems. The development of advanced storage technologies, such as lithium-ion batteries and hydroelectric storage, is essential to mitigate ERI intermittency and improve grid stability. In addition, political and economic considerations play a key role in the integration of ERIs, as well as various fiscal and financial incentives implemented in Latin America and the Caribbean to encourage investment in renewable energy and storage technologies. It is noted that the adaptation of regulatory frameworks is essential to promote the equitable participation of ERIs and ensure the security of electricity supply.

Key words: intermittent renewable energies; smart grid; demand management; production management; energy forecasting; energy management.

Beneficios de las Energías Renovables Intermitentes (ERI)

Reducción de emisiones.

Las ERI, al no depender de combustibles fósiles, ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el cambio climático. Durante años, la utilización de fuentes de energía fósil, se ha relacionado como el mayor productor de emisiones de gases de efecto invernadero, alcanzando en 2019 los 38 GtCO₂e²⁰ (rango de ± 1.9) (Montoya Martín del Campo, 2022), y es por ello que diversos organismos internacionales mencionados en Li *et al.* (2022), han manifestado que una de las propuestas globales para frenar el incremento de las emisiones, es la producción energética por medio de energías renovables, tratando de frenar los efectos adversos.

La creciente incorporación de estas centrales a la red eléctrica de cada país va aunado a la eficiencia y seguridad energética, el desarrollo tecnológico y cuidado del medio ambiente, como es el caso de los acuerdos de París establecidos por cada país, para colaborar con la prevención del cambio climático. Otra ventaja es la diversificación de la matriz energética, al aprovechar cada país diferentes formas de producir energía, disminuyendo la dependencia energética (Li *et al.*, 2022).

Con base en la información de Montoya Martín del Campo (2022), el porcentaje mundial generado de dióxido de carbono de 1850 a 2021 corresponde al 20.5% en Estados Unidos, 20% en China y 1.2% en México. Sin embargo, México ha aumentado su participación de energías renovables en su matriz energética, no obstante, el tamaño de dicha matriz es menor que la de Estados Unidos y China. Además, este contraste demuestra que si bien, es importante la participación en la disminución de los gases de efecto invernadero, cada país los realiza bajo su propia soberanía energética, debido a que los compromisos internacionales adoptados implican cambios en diversos ámbitos (generación, transporte y distribución).

Diversificación energética.

La diversificación energética puede manifestarse de diferentes formas: como una forma de aplicar un enfoque sistemático a la gestión de

la transición energética, como un complejo conjunto de cambios organizativos y técnicos en el sector de la energía eléctrica, y como un mecanismo institucional de apoyo a las innovaciones (Gitelman *et al.*, 2023). La diversificación energética es importante para asegurar la seguridad energética de todos los países, en especial los países en vías de desarrollo (Seriño, 2022). Otro aspecto importante para asegurar la diversificación energética es incluir el aspecto de sostenibilidad en las directrices y normativas de los países que intentan llegar a esa diversificación energética (Farah, 2021).

Innovación tecnológica

El desarrollo tecnológico es inevitable para sobrellevar la variación en la producción de energía y consecuencias que ocasionan, una de las acciones consideradas actualmente es el almacenamiento, para evitar congestionar la red en horas de gran suministro y evitar el desabasto en horas de menor producción, otras tecnologías son la generación distribuida, las redes inteligentes y equipos que cuenten con sus propios sistemas de generación. Por otra parte, la variabilidad en generación impacta en la calidad de la energía producida, es por ello que además del desarrollo tecnológico, también es importante contar con modelos de pronósticos para planificar eficazmente la generación en diferentes periodos de tiempo, para aprovechar los recursos de manera adecuada (Mlilo *et al.*, 2021). La integración exitosa de las energías renovables variables depende de la pronta solución a las consecuencias de su intermitencia, ya sea por desarrollo tecnológico, métodos de análisis o planes de acción ante diversos escenarios.

Desafíos de la integración de ERI

La diversificación de la matriz energética cuenta con un enfoque clave en la planificación energética, contar con múltiples fuentes energéticas con el fin de satisfacer el consumo energético de la población es de vital importancia para el mundo moderno donde las emisiones de contaminantes por combustibles fósiles han crecido descomunalmente, por ello, el uso de energías alternativas se adapta a nuestros fines, sin embargo, estas no son perfectas y algunas presentan problemas como intermitencia y variabilidad, destacando la energía solar y eólica.

Intermitencia y variabilidad del suministro eléctrico.

La generación de energía solar y eólica está sujeta a las condiciones climáticas y temporales, lo que puede provocar fluctuaciones en la oferta de energía. Algunos factores como las condiciones climáticas, topográficas, temporales, entre otras, pueden generar problemas en la generación eléctrica. Esto se puede traducir en problemas como la intermitencia y variabilidad (Khalid, 2024), las cuales al presentarse en la red eléctrica pueden ocasionar la variación de la regulación de tensión, variación de la frecuencia y falta de capacidad para suministrar la demanda energética.

La intermitencia puede verse en sistemas de generación solar por la dependencia de estos a las horas de aprovechamiento de luz solar de un lugar y tiempo determinados; la producción oscila a lo largo del día y algunos efectos atmosféricos son responsables de dichas oscilaciones, como nubes, polvo, niebla, nieve, entre otros (Engeland *et al.*, 2017). Por otro lado, los sistemas de generación eólicos requieren un flujo constante de viento para su funcionamiento, sin embargo, la variabilidad puede ocasionar problemas de despacho potencia, lo que conlleva a cortes de energía y reducción en la confiabilidad del suministro de potencia (Yuan *et al.*, 2020).

Necesidades de ampliación en la infraestructura eléctrica

Es cierto que la transición hacia las energías renovables plantea desafíos importantes para la infraestructura eléctrica, principalmente si tratamos con energías intermitentes. De acuerdo con Jenss (2021), estas requieren una red eléctrica que garantice el suministro constante y confiable de energía, al igual que equipos de almacenamiento de alta eficiencia. Esto puede requerir altas inversiones en tecnologías de almacenamiento como baterías, sistemas de almacenamiento hidroeléctrico y modernización de la red que conlleve una buena gestión de la carga, desarrollo de infraestructura inteligente. Cabe destacar que la modernización de la red ofrece múltiples beneficios como eficiencia operativa y funciones de gestión más avanzadas donde incluso el consumidor es parte del proceso mediante tecnologías como contadores

inteligentes y sistemas de comunicación avanzados. (Oliveiro *et al.*, 2023).

De acuerdo con Castineyra *et al.* (2023), el impacto que tienen las energías renovables en América Latina de acuerdo con el mercado de energía muestra valores de 37% para energía hidráulica, 14% energía eólica, 10% energía solar y 28% de gas natural, lo cual ha tenido un gran impacto en la infraestructura eléctrica de varios países. Esto ha desembocado en grandes inversiones a este sector para modernizar las redes eléctricas.

Según el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), en 2023 (Secretaría de Energía, 2023) México ha tenido un incremento significativo en la generación limpia e integración de energías renovables, donde se contabilizaba al 2022 que la generación de energía eléctrica total por energías limpias (aquella que se encuentra “libre de combustible”) ascendía al 31.2%. Sin embargo, al cuestionar este término de energías limpias y bajo el estándar de energías de origen renovable, los cálculos establecidos se reducen a un 28.7% de la generación total.

Cabe destacar que, en los últimos años, el PRODESEN no ha calculado la proporción de energía limpia que se generara para años a futuro en su totalidad, como en la última edición donde no se tiene un valor claro para fechas como 2024, donde se esperaba un aumento al 35% de la generación eléctrica según la Ley de Transición Energética, la Ley General de Cambio Climático y el Acuerdo de París.

Igualmente, se mantiene una tendencia de crecimiento en el consumo de electricidad, la cual podrá potencialmente rebasar proyecciones, donde se tenía que en los próximos 15 años (2023 – 2037) el consumo neto de energía eléctrica se incrementará en una tasa promedio anual del 2.5%. Esto obliga a los proveedores de energía eléctrica aumentar las capacidades instaladas en centrales de generación, que al igual en PRODESEN tiene una estimación de crecimiento del 67% entre 2022 y 2037 y, en cuanto a generación distribuida, esta tendrá un crecimiento de hasta el 338% según estimaciones de 2022 al 2037, lo que implica el cambio en la red eléctrica de distribución con el fin de que el usuario se vuelva parte como productor y consumidor, según los contratos de consumo que marca la Comisión Federal de Electricidad.

Impacto en la estabilidad de la red

Como se mencionó anteriormente, el uso de energías renovables, en conjunto con sus problemas que conlleva la intermitencia y variabilidad de estos, sugieren un impacto en la estabilidad de la red, la cual puede volverse inestable debido al suministro de energía errático, lo que podría resultar en daños al equipo, interrupciones y cortes de energía.

Existen problemas documentados en la literatura que se presentan para la estabilidad del voltaje y frecuencia de la red, ante la integración de fuentes de energías renovables. A continuación, se describen tres casos:

1. Variaciones de voltaje y frecuencia. La naturaleza de las fuentes intermitentes como solar y eólica afecta los valores de frecuencia y voltaje lo que genera problemas de confiabilidad del suministro. Como ejemplo, se tiene que en el trabajo de Mokeke y Thamae (2021), se realizó una simulación de la red nacional de Lesotho, África, considerando múltiples sistemas de generación energética por solar fotovoltaica y eólica y una falla eléctrica con el fin de observar la adaptación de la red ante variaciones de voltaje, frecuencia y tiempos de respuestas teniendo penetración de sistemas de generación por fuentes renovables, donde la intermitencia en estos sistemas en conjunto con la falla generan respuestas tardías por parte del sistemas de protección y los reguladores de voltaje y frecuencia. Los inversores y bancos de baterías pueden ser empleados para aportar inercia y soporte de voltaje al sistema de potencia (Mokeke y Thamae, 2021).
2. Sobrecarga de líneas eléctricas y subestaciones. Tradicionalmente los sistemas de distribución se han diseñado para operar de manera radial, sin embargo, la integración de las ERI, en combinación con un escenario de demanda mínima y generación máxima pueden ocasionar la congestión de líneas y transformadores. Algunos de los problemas que se pueden presentar son: mala operación de los sistemas de protección, colapso de la red eléctrica, etc. (Cosgrove *et al.*, 2023).
3. Desajuste entre la demanda y oferta de energía. La producción de energía renovable puede ser muy alta en algunos momentos, pero también

puede ser baja en otras condiciones. Para los generadores, el no poder suministrar toda la capacidad se refleja en pérdidas económicas. (Song *et al.*, 2023). Debido a ello y en términos de confiabilidad y resiliencia, los gestores de redes eléctricas pueden presentar ciertos grados de incertidumbre en cuanto el suministro eléctrico que pueden proveer según la necesidad de los usuarios. Como se menciona en el trabajo de Song *et al.* (2023), la energía renovable es inherentemente intermitente y en sistemas eléctricos que buscan el desarrollo a redes de emisiones cero es importante la introducción de fuentes renovables. En su caso, en Reino Unido, diversos escenarios de redes de cero emisiones se han generado y en su mayoría requieren sistemas de almacenamiento de alta eficiencia con el fin de solventar la demanda y oferta de energía eléctrica sin importar las condiciones de terreno, meteorológicas y/o crecimiento poblacional. Sin embargo, la implicación de mejorar la red eléctrica con sistemas de almacenamiento podría causar potencialmente el aumento en costos de energía eléctrica.

Soluciones y Estrategias

Gestión de la producción (Curtailment)

Las altas penetraciones de capacidad ERI, como la eólica y la solar, pueden llevar a la restricción del generador de ERI debido a la capacidad limitada de la red eléctrica para recibir esta energía. De acuerdo con Niet *et al.* (2018), el curtailment conlleva un aumento de los costes, que corren a cargo del operador del sistema eléctrico si el contrato con el generador de ERI es obligatorio, o del propietario del generador. Estos costes, que denominamos costes de restricción, incluyen: requisitos contractuales de pago directo al operador del generador; pérdida de créditos de energía renovable; y aumento del coste del ciclo de vida de la ERI porque los costes fijos y de capital se amortizan a lo largo de una menor cantidad de generación.

Diversos factores, como la combinación de generación, la estructura del mercado, las normas de funcionamiento y la red de transporte, afectan al funcionamiento de los generadores de energías renovables y, por tanto, a la posibilidad de que se produzcan restricciones. Por ello, puede ser útil

para las regiones que esperan un crecimiento de la generación de energías renovables conocer la experiencia en diversas jurisdicciones (Bird *et al.*, 2016).

Existen algunas soluciones en la literatura que permiten reducir el curtailment en algunos escenarios, como el trabajo de Chen y Wei (2023), que por medio de un algoritmo avanzado de despacho encontraron el escenario de despacho óptimo para los casos estudiados. Otro ejemplo es el de Wang *et al.* (2021), que trabajaron con un sistema eléctrico-térmico de distribución para generar un algoritmo de optimización de la gestión.

Gestión de la demanda.

La gestión de la demanda es crucial para la integración de las energías renovables intermitentes, como la solar y la eólica, debido a varios factores clave. Primero, ayuda a equilibrar la oferta fluctuante con la demanda constante o variable de energía, evitando desequilibrios en la red eléctrica. Dado que las energías renovables intermitentes no siempre producen energía de manera constante, la gestión de la demanda permite ajustar el consumo en función de la disponibilidad de estas fuentes, asegurando un suministro más estable (Dwijendra *et al.*, 2023).

En segundo lugar, la gestión de la demanda reduce la necesidad de costosos sistemas de almacenamiento de energía. En lugar de almacenar el exceso de energía producido durante los picos de generación, la demanda puede ser ajustada para consumir esa energía directamente. Esto optimiza el uso de la energía renovable disponible y minimiza los costos asociados al almacenamiento (Badugu *et al.*, 2021). Además, permite utilizar de manera más eficiente la infraestructura de generación y distribución existente, evitando o posponiendo inversiones en nuevas capacidades de generación o transmisión. Al ajustar la demanda, se pueden maximizar los recursos disponibles sin la necesidad de expandir significativamente la infraestructura, lo que resulta en ahorros económicos y una menor huella ambiental (Yu *et al.* 2023). La gestión de la demanda también contribuye a la estabilidad de la red eléctrica al reducir picos y valles de demanda, facilitando

una operación más suave y predecible. Las variaciones rápidas en la producción de energías renovables pueden causar inestabilidad en la red, y ajustar la demanda ayuda a mitigar estos efectos, mejorando la fiabilidad del suministro eléctrico.

Un aspecto emergente en la gestión de la demanda es el rol de los “prosumers”, consumidores que también producen energía. Los prosumers, mediante la generación distribuida, como los paneles solares en hogares y empresas, pueden ajustar su consumo y producción en función de la demanda y la oferta de energía renovable (Venizelou *et al.*, 2020). Esto no solo ayuda a estabilizar la red, sino que también permite a los prosumers beneficiarse económicamente mediante la venta de su excedente de energía o la reducción de su consumo en momentos de alta demanda y precios elevados.

Almacenamiento de energía: Desarrollo de tecnologías de almacenamiento avanzadas, como baterías de ion-litio, sistemas de almacenamiento térmico y almacenamiento hidroeléctrico a gran escala

Las aplicaciones de las baterías a escala de red se estudiaron en Niet *et al.* (2018) considerando su capacidad para integrar la generación intermitente en sistemas eléctricos basados en estructuras de mercado y escenarios de despliegue. Se concluye que una mayor disminución de los precios, especialmente de las baterías, como se ha observado en años recientes, supondrá un aumento de la rentabilidad de las aplicaciones de los sistemas de almacenamiento y abrirá oportunidades para otros servicios y aplicaciones. En el norte del México existen ejemplos de bancos de baterías interconectados a la red eléctrica con una capacidad de 12.3 GWh. Adicional a esto se espera un crecimiento del 11.44% para el 2024 (Secretaría de Energía, 2023). Con el análisis de los mercados actuales y futuros de los sistemas de almacenamiento de energía se ha hecho evidente que las normas y reglamentos actuales en todos los mercados no son coherentes y tienen una gran influencia en la viabilidad económica del despliegue de las baterías.

Integración de redes inteligentes

El desarrollo e implementación de sistemas de medición inteligentes en las redes de distribución eléctrica pueden ser considerados como un factor significativo, constituyendo uno de los primeros pasos en la transición hacia las redes inteligentes (Dumitru *et al.*, 2023).

La adopción masiva de fuentes de energía renovables como se ha venido estableciendo en este texto, está impulsando la transición hacia redes eléctricas más complejas, diseñadas bajo el paradigma de la red inteligente. En este contexto, los clústeres energéticos requieren nuevas metodologías para la gestión dinámica de los recursos energéticos distribuidos, que permitan adaptarse a variables en tiempo real, optimizar la eficiencia energética, promover la formación de asociaciones y superar las barreras para una integración efectiva de las energías renovables en la red (Succetti *et al.*, 2020).

Otro problema inherente al cambio de paradigma energético está en la fiabilidad y calidad de las redes inteligentes las cuales se han vuelto fundamentales. Las técnicas de pronóstico de producción de energía renovable, especialmente en energía eólica y solar fotovoltaica, han experimentado un rápido desarrollo, en particular, en el pronóstico de producción solar fotovoltaica. En ese contexto se han aplicado diversas técnicas de aprendizaje automático e híbridas con éxito, por ejemplo, el modelo implementado como PVPNet red neuronal profunda de alta precisión denominado para pronosticar la potencia de salida del sistema fotovoltaico, entre otros sistemas integrados a la red (Huang y Kuo, 2029), o mediante el uso de modelos meteorológicos numéricos como el realizado por Prósper *et al.* (2019) y Sosa-Tinoco *et al.* (2021).

Consideraciones Políticas y Económicas

Las implicaciones ante la integración de las ERI

Las implicaciones de la integración de las ERI no son solo técnicas, también están las de carácter político y económicas. Ambas, son clave para integración de los sistemas eléctricos de potencia. Bajo este contexto, en esta sección se abordarán

los principales incentivos implementados en Latinoamérica y el Caribe (Ferroukhi *et al.*, 2023) para acelerar la integración de las ERI, así como también su transcendencia regulatoria en los países.

Incentivos: Implementación de políticas fiscales que fomenten la inversión en energías renovables y tecnologías de almacenamiento

De acuerdo con estudios realizados, seis de los 30 países más afectados por el cambio climático, pertenecen a Latinoamérica y el Caribe (Vera *et al.*, 2023). Esto llevó a la creación e implementación de instrumentos financieros y fiscales para acelerar la integración de las ERI. Los instrumentos pueden ser la inversión pública directa, inversión privada, inversión de agencias internacionales sin fines de lucro y los estímulos fiscales (Podestá *et al.*, 2022). En la Tabla 1, se muestran algunos estímulos e iniciativas implementadas en diferentes países de Latinoamérica y el Caribe.

Como se puede apreciar, el financiamiento de los estímulos e iniciativas, son el resultado de la colaboración gubernamental, organismos privados y asociaciones internacionales. El objetivo de cada estímulo va enfocado a combatir el cambio climático y así cumplir con los acuerdos y tratados a los cuales los países latinoamericanos forman parte. Los estímulos van desde hacer el uso eficiente de la energía, hasta la de diseñar e implementar proyectos de generación basada en ERI.

Integración a los mercados eléctricos

Adaptación de los marcos regulatorios para promover la participación equitativa de las ERI y garantizar la seguridad del suministro.

Aunque cada país se legisla de manera autónoma, dirigen sus acciones para combatir el cambio climático y cumplir compromiso adquirido durante el Acuerdo de París en 2015. Para reforzar este compromiso, se llevó a cabo el COP 28 con sede en Dubai, en diciembre del 2023.

Para ello, los países deben estar abiertos a adoptar nuevas prácticas en el sector del mercado eléctrico incluyendo a las ERI. Sin embargo, la

integración de las ERI a los mercados eléctricos es un reto actual, ya que, debido a su naturaleza intermitente y su limitada disponibilidad, suelen catalogarse como complicadas comparadas con las fuentes de generación convencionales como las plantas carboeléctricas, ciclo combinado y gas natural (Bersalli *et al.*, 2020). Esta característica intermitente, convierte al despacho económico, no solo en un problema de optimización y minimización de costos, sino también, en un buscador constante de soluciones y de soporte operativo novedoso que aporten la confiabilidad

operativa y la viabilidad económica necesarias para integrar correctamente a las ERI. La colaboración entre instituciones privadas, de gobierno y educativas para proponer estrategias de control y gestión que permitan la óptima integración de las ERI, se realiza de forma activa.

Según han planteado las iniciativas de organismos como la UNESCO, IRENA, GIZ, etc., los gobiernos y participantes del mercado eléctrico deben hacer la revisión y actualización continua en cuestión regulatoria de la industria eléctrica.

Tabla 1. Estímulos e iniciativas implementadas en Latinoamérica y el Caribe para acelerar la integración ERI.

País / Países	Estímulo Fiscal/Iniciativa	Objetivo	Soporte
Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, República Dominicana, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Uruguay.	Renewables in Latin America and the Caribbean Initiative (RELAC).	Lograr que la energía renovable tenga una penetración del 70% para el 2030.	Agencias: IRENA, GIZ, IEA, NREL, LEDS, WWF.
Centroamérica, El Caribe, Sudamérica.	Climate Investment Platform (CIP).	Incentivar el desarrollo y financiamiento de proyectos de energías renovables.	UNDP, IRENA, SEforALL, GCF, Gobiernos, diversas instituciones financieras.
	Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA).	Adquisición y reemplazo de equipos obsoletos por equipos eficientes.	Intermediarios financieros registrados y autorizados, inversión pública, estímulos fiscales.
	Fideicomiso para el Desarrollo de la Energía Eléctrica (FIDE).	Coadyuvar en las acciones de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica.	Inversión pública, inversión privada, estímulos fiscales.
	Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO).	Impulsar proyectos enfocados a la producción y el uso de energías renovables en el campo mexicano.	Inversión pública directa, estímulos fiscales.

Conclusiones

La integración de ERI en las redes eléctricas presenta tanto beneficios como desafíos significativos. En términos de beneficios, las ERI contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, diversificar la matriz energética y fomentar la innovación tecnológica en el sector eléctrico. Sin embargo, esta integración también plantea desafíos, como la intermitencia y variabilidad en la generación, la necesidad de ampliar la infraestructura eléctrica y los impactos en la estabilidad de la red. Para abordar estos desafíos, se requieren soluciones y estrategias específicas, por ejemplo, la gestión de la producción y la demanda juega un papel crucial, permitiendo ajustar la oferta y la demanda de energía de manera eficiente. Además, el almacenamiento de energía, mediante tecnologías avanzadas, proporciona una forma de mitigar la intermitencia de las ERI y mejorar la estabilidad de la red. La integración de redes inteligentes también permitirá que por medio de algoritmos de optimización y algoritmos de pronóstico se adapten adecuadamente a las fluctuaciones de la red inherentes a las fuentes de generación.

Otro punto importante son las consideraciones políticas y económicas también son fundamentales en este proceso. La implementación de incentivos financieros y fiscales, así como la adaptación de los marcos regulatorios, son necesarias para promover la integración de las ERI en los mercados eléctricos y cumplir con los compromisos internacionales en materia de cambio climático.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a la red de eficiencia térmica industrial RIETI-CYTED por brindarnos la oportunidad de compartir experiencias en energías renovables y enriquecernos con valiosos conocimientos de las instituciones colaboradoras. Su contribución ha sido fundamental para nuestro aprendizaje y crecimiento en este campo tan importante. Finalmente, agradecemos el trabajo de revisión efectuado por Efraín Gómez, el cual permitió mejorar la versión final de este trabajo.

Referencias

- Badugu, J., Yeddula Pedda, O., & Choppavarapu, S. B. (2021). Role of Demans Side Management in Residential Distribution Systems with the Integration of Electric Vehicles. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16(1), 43-54. doi:<https://doi.org/10.1007/s42835-020-00566-8>
- Bersalli, G., Menanteau, P., & El-Methni, J. (2020). Renewable Energy Policy Effectiveness: A Panel Data Analysis Across Europe and Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110351>
- Bird, L., Lew, D., Milligan, M., Carlini, E., Estanqueiro, A., Flynn, D., . . . Miller, J. (2016). Wind and solar energy curtailment: A review of international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 577-586. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.082>
- Castineyra, D., Yokota, J., Macchi, C., Fullone, C. L., Ferreira, B., & Schwarz, M. (2023). Transición energética y su impacto en los precios de la energía en América Latina. Retrieved from S & P Global Ratings: https://www.spglobal.com/_assets/documents/ratings/es/pdf/2023/2023-12-06-transicion-energetica-y-su-impacto-en-los-precios-de-la-energia-en-america-latina.pdf
- Chen, Y., & Wei, W. (2023). Robust Generation Dispatch With Strategic Renewable Power Curtailment and Decision-Dependent Uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(5), 4640-4654. doi:<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3214856>

- Cosgrove, P., Roulstone, T., & Zachary, S. (2023). Intermittency and periodicity in net-zero renewable energy systems with storage. *Renewable Energy*, 212, 299-307. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.135>
- Dumitru, C.-D., Gligor, A., Vlasa, I., Simo, A., & Dzitac, S. (2023). Energy Contour Forecasting Optimization with Smart Metering in Distribution Power Networks. *Sensors*, 23(3). doi:<https://doi.org/10.3390/s23031490>
- Dwijendra, N. K., Anupong, W., Althahabi, A. M., Abdulameer, S. A., Al-Azzawi, W. K., Jaber, M. M., . . . Al Mashhadani, Z. I. (2023). Optimal Dispatch of the Energy Demand in Electrical Distribution Grid with Reserve Scheduling. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 80-91. doi:<https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0007>
- Engeland, K., Borga, M., Creutin, J. D., Françoise, B., Ramos, M. H., & Vidal, J. P. (2017). Space-time variability of climate variables and intermittent renewable electricity production - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 600-617. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.046>
- Farah, P. D. (2021). Strategies to Balance Energy Security, Business, Trade and Sustainable Development. *SSRN*, 13(2), 95-99. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.3658668>
- Ferroukhi, R., Kieffer, G., & López-Peña, Á. (2023). Renewable Energy Market Analysis: Latin America. IRENA. Retrieved from https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Market_Analysis_Latin_America_2016.pdf?rev=76cc15c58ba34c648b84209168740ce7
- Gitelman, L., Kozhevnikov, M., & Visotskaya, Y. (2023). Diversification as a Method of Ensuring the Sustainability of Energy Supply within the Energy Transition. *Resources*, 12(2). doi:<https://doi.org/10.3390/resources12020019>
- Huang, C.-J., & Kuo, P.-H. (2019). Multiple-Input Deep Convolutional Neural Network Model for Short-Term Photovoltaic Power Forecasting. *IEEE Access*, 7, 74822-74834. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921238>
- Jenss, A. C. (2021). Gobernanza de la expansión: Infraestructuras transnacionales de energía en América Latina. *Perfiles Latinoamericanos*, 29(58). doi:<https://doi.org/10.18504/pl2958-007-2021>
- Khalid, M. (2024). Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges. *Energy Strategy Reviews*, 51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101299>
- Li, L., Lin, J., Wu, N., Xie, S., Meng, C., Zheng, Y., . . . Zhao, Y. (2022). Review and outlook on the international renewable energy development. *Energy and Built Environment*, 3(2), 139-157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.12.002>
- Mlilo, N., Brown, J., & Ahfock, T. (2021). Impact of intermittent renewable energy generation penetration on the power system networks - A review. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 6(1). doi:<https://doi.org/10.1007/s40866-021-00123-w>
- Mokeke, S., & Thamae, L. Z. (2021). The impact of intermittent renewable energy generators on Lesotho national electricity grid. *Electric Power Systems Research*, 196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107196>

- Montoya Martín del Campo, A. (2022). Transición Energética Soberana y litio como área estratégica, en la Iniciativa de reforma a los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Foro 16). Ciudad de México: H. Cámara de Diputados.
- Niet, T., Lyseng, B., English, J., Keller, V., Palmer-Wilson, K., Robertson, B., . . . Rowe, A. (2018). Valuing infrastructure investments to reduce curtailment. *Energy Strategy Reviews*, 22, 196-206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.010>
- Oliveiro, A., Díaz Echeverría, A., Afonso, N., Sánchez Campos, A., & Bordiu García-Ovies, C. (2023). Hoja de ruta para la transformación digital del sector energético en América Latina y el Caribe. BID. Retrieved from <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Hoja-de-ruta-para-la-transformacion-digital-del-sector-energetico-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Podestá, A., Eirin, M. S., Contreras Lisperguer, R., & Salgado Pavez, R. (2022). Políticas de atracción de inversiones para el financiamiento de la energía limpia en América Latina. CEPAL. Retrieved from <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/4e3ed738-06ee-45cc-9f79-7c2457b327bc/content>
- Prósper, M. A., Sosa Tinoca, I., Otero-Casal, C., & Miguel-Macho, G. (2019). Downslope windstorms in the Isthmus of Tehuantepec during Tehuantepecer events: A numerical study with WRF high-resolution simulations. *Earth System Dynamics*, 10(3), 485-499. doi:<https://doi.org/10.5194/esd-10-485-2019>
- Secretaría de Energía. (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037. Secretaría de Energía. Retrieved from <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>
- Seriño, M. N. (2022). Energy security through diversification of non-hydro renewable energy sources in developing countries. *Energy & Environment*, 33(3), 546-561. doi:<https://doi.org/10.1177/0958305X211013452>
- Song, Y., Shahzad, U., & Paramati, S. R. (2023). Impact of energy infrastructure investments on renewable electricity generation in major Asian developing economies. *Australian Economic Papers*, 62(1), 1-23. doi:<https://doi.org/10.1111/1467-8454.12282>
- Sosa Tinoco, I., Prosper, M. A., & Miguel-Macho, G. (2021). Development of a solar energy forecasting system for two real solar plants based on WRF Solar aerosol input and a solar plant model. *Solar Energy*, 120, 329-341. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.049>
- Succetti, F., Rosato, A., Araneo, R., & Panella, M. (2020). Deep Neural Networks for Multivariate Prediction of Photovoltaic Power Time Series. *IEEE Access*, 8, 490-505. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039733>
- Venizelou, V., Makrides, G., Efthymiou, V., & Georghiou, G. E. (2020). Methodology for deploying cost-optimum price-based demand side management for residential prosumers. *Renewable Energy*, 153, 228-240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.025>

- Vera, F., Uribe, M. C., & del Castillo, S. (2023). Accion climática y Acuerdo de París: El rol de las ciudades de América Latina y el Caribe. Retrieved from Publicaciones - BID: <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Accion-climatica-y-Acuerdo-de-Paris-el-rol-de-las-ciudades-de-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Wang, W., Huang, S., Zhang, G., Liu, J., & Chen, Z. (2021). Optimal Operation of an Integrated Electricity-Heat Energy System Considering Flexible Resources Dispatch for Renewable Integration. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(4), 699-710. doi:<https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000917>
- Yu, B., Fang, D., Xiao, K., & Pan, Y. (2023). Drivers of renewable energy penetration and its role in power sector's deep decarbonization towards carbon peak. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113247>
- Yuan, Q., Zhou, K., & Yao, J. (2020). A new measure of wind power variability with implications for the optimal sizing of standalone wind power systems. *Renewable Energy*, 150, 538-549. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.121>

Manuscrito recibido: 12 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 18 de noviembre de 2024

Manuscrito aceptado: 21 de noviembre de 2024

Rumbo a los Sistemas Híbridos que utilizan el Motor Stirling

Germán Rodríguez-Sosa, Mario F. Suzuki-Valenzuela, Pablo Alberto Limón-Leyva, Ian Sosa-Tinoco

Instituto Tecnológico de Sonora, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,

Antonio Caso S/N Col. Villa ITSON, Ciudad Obregón, Sonora, México

german.rodriguez70279@potros.itson.edu.mx

mario.suzuki@itson.edu.mx

pablo.limon@itson.edu.mx

ian.sosa@itson.edu.mx

Resumen

Este capítulo aborda la evolución, diseño y aplicaciones de los motores Stirling, en sus diferentes variantes como los son el alfa, beta y gama, enfatizando su importancia en la sostenibilidad y eficiencia energética. Las investigaciones revisadas destacan la optimización del rendimiento termodinámico y la integración de materiales avanzados para mejorar la eficiencia y durabilidad. Se analizan aplicaciones en generación de energía, refrigeración y cogeneración de calor y electricidad (micro-CHP), resaltando su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética. Los sistemas híbridos que combinan motores Stirling con otras tecnologías, como paneles solares o sistemas de biomasa, se presentan como soluciones efectivas para maximizar la eficiencia energética y la versatilidad operativa.

Estos sistemas híbridos aprovechan las ventajas de múltiples fuentes de energía, ofreciendo una mayor estabilidad y fiabilidad en la generación de energía. Los estudios muestran que los motores Stirling pueden alcanzar altos niveles de eficiencia térmica y fiabilidad operativa, no obstante, se identifican desafíos, como la optimización de parámetros de diseño, selección de materiales adecuados y reducción de costos de inversión y fabricación. A pesar de estos retos, las oportunidades para mejorar la viabilidad comercial y eficiencia de estos sistemas son significativas, algunos estudios indican que, bajo condiciones de alta eficiencia, estos sistemas son preferibles a las tecnologías convencionales, sin embargo, con eficiencias más realistas, no siempre son competitivos en términos ambientales ni económicos. Los motores Stirling y los sistemas híbridos que los utilizan representan una tecnología prometedora para un futuro energético más sostenible y eficiente.

Palabras clave: Motor Stirling, Sistema dish Stirling, Sistemas híbridos, Energía solar, Biogás.

Abstract

This chapter addresses the evolution, design, and applications of Stirling engines, in their different variants such as alpha, beta and gamma, emphasizing their importance in sustainability and energy efficiency. Research reviewed highlights the optimization of thermodynamic performance and the integration of advanced materials to improve efficiency and durability. Applications in power generation, refrigeration and combined heat and power (micro-CHP) are analyzed, highlighting their ability to reduce greenhouse gas emissions and improve energy efficiency. Hybrid systems that combine Stirling engines with other technologies, such as solar panels or biomass systems, are presented as effective solutions to maximize energy efficiency and operational versatility. These hybrid systems take advantage of multiple energy sources, offering greater stability and reliability in power generation. Studies show that Stirling engines can achieve high levels of thermal efficiency and operational reliability. However, challenges are identified, such as optimization of design parameters, selection of suitable materials and reduction of investment costs. Despite these challenges, the opportunities for improving the commercial viability and efficiency of these systems are significant. Some studies indicate that, under high efficiency conditions, these systems are preferable to

conventional technologies. However, at more realistic efficiencies, they are not always environmentally or economically competitive. Stirling engines and the hybrid systems that use them represent promising technology for a more sustainable and efficient energy future.

Key words: Stirling engine, Stirling dish system, Hybrid systems, Solar energy, Biogas.

Introducción

Revisiones previas al 2021 del motor Stirling

Investigaciones previas relacionadas al motor Stirling hasta el año 2021 se han centrado en la optimización de rendimiento, eficiencia, sostenibilidad, integración de tecnologías, modelado y control avanzado, siendo áreas de interés para lograr un mejor funcionamiento individual del motor, así como de encontrar sinergias con otras tecnologías.

Los estudios han abordado la optimización del rendimiento termodinámico de los motores Stirling, considerando variables como el volumen muerto, la efectividad del regenerador y la frecuencia de operación (Getie *et al.*, 2020; Schneider *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021), aunado a materiales avanzados y tecnologías innovadoras para mejorar la resistencia, eficiencia y rendimiento (Singhet *et al.*, 2018; Zare *et al.*, 2021), así mismo, la optimización de parámetros como la frecuencia de operación y las carreras de los pistones puede mejorar la potencia y eficiencia de los motores Stirling (Zare *et al.*, 2021), la exploración de ciclos de trabajo alternativos y la optimización detallada de la geometría del motor son áreas prometedoras para mejorar el rendimiento (Getie *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021). Aunado a lo anterior, otros estudios han destacado el potencial de los motores Stirling como una alternativa sostenible en comparación con sistemas convencionales, especialmente en términos de eficiencia energética y reducción de emisiones (Hachem *et al.*, 2018; Zare *et al.*, 2021), con lo que otras investigaciones han resaltado la importancia de seguir avanzando en el desarrollo de tecnologías CHP basadas en motores Stirling para aumentar la eficiencia y viabilidad comercial

(Zare *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021). Por otra parte investigaciones han desarrollado modelos termodinámicos avanzados, sumando al diseño y centrados en analizar el rendimiento explorado estrategias de control avanzadas para mejorar la eficiencia y respuesta dinámica (Ahmed *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021). Se ha demostrado que el uso de técnicas híbridas, puede emplearse para modelar adecuadamente los motores Stirling (Zare *et al.*, 2021), lo anterior asociado al funcionamiento y mejora es ampliamente abordado. En lo relacionado a aplicaciones híbridas o aplicaciones específicas se han explorado desde la generación de energía, la refrigeración, o sistemas de energía utilizando biomasa como combustible (Ahmed *et al.*, 2020; Schneider *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021). En esta misma línea los estudios han identificado desafíos específicos, como la formación de escorias en intercambiadores de calor debido a las cenizas.

En lo relacionado a las brechas del conocimiento, existen varios tópicos, como la optimización de parámetros, la geometría para mejorar la eficiencia (Zare *et al.*, 2021), la frecuencia de operación, las carreras de los pistones, la potencia máxima y eficiencia de los motores (Schneider *et al.*, 2020; Zare *et al.*, 2021), la integración de materiales avanzados para mejorar la resistencia y eficiencia (Singh *et al.*, 2018), la formación de escorias en intercambiadores de calor en sistemas de biomasa para mejorar la eficiencia y durabilidad de los sistemas (Zare *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021), la integración de técnicas de computación para desarrollar modelos predictivos más precisos y eficientes y finalmente lo relacionado a la reducción de costos de inversión para aumentar la viabilidad comercial de los sistemas Stirling (Zare *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2021).

Motor Stirling: Tecnología y Principios de Funcionamiento

El motor Stirling fue inventado por Roberto Stirling en 1816. Este motor puede trabajar con muchas fuentes de energía y suministrar la parte externa del receptor del motor, sin embargo, el rápido desarrollo de los motores de combustión interna ocasionó una falta de interés. Sin embargo, los problemas de calentamiento global y la explotación de combustibles fósiles han hecho que se retomen el interés por estos motores en recientes años. Algunas de sus características son el poder trabajar continuamente con bajo ruido y mantenimiento fácil y económico con fuentes de calor como la Solar, geotérmica e incluso con calor de desperdicio (Arslan *et al.*, 2023).

Principios básicos

Los motores Stirling tienen la particularidad de funcionar con un suministro de calor externo, de tal manera, que los hace flexibles a cualquier fuente de calor, con una buena eficiencia. El ciclo Stirling consiste en comprimir y expandir un gas de trabajo que puede ser helio, hidrógeno,

nitrógeno o aire (Rodríguez-Sosa, 2019). En la compresión isotérmica A-B (Figura 1, de 0-90 grados en el eje) el gas de trabajo se comprime mientras la temperatura se mantiene constante mediante el sistema frío. Al fluido comprimido de baja temperatura se transfiere calor del regenerador a volumen constante, proceso isocórico de B-C (Figura 1, de 90 a 180 grados en el eje) y la expansión isotérmica sucede de C-D (Figura 1).

Los motores Stirling se clasifican por su configuración y modo de operación. Las configuraciones más comunes son alfa, beta y gamma (Figura 2). El motor alfa tiene dos pistones conectados en serie (un lado frío y otro caliente). En el motor tipo beta, el pistón y desplazador se ubican en un solo cilindro, mientras que el tipo gamma tiene los pistones de potencia y de desplazamiento, en cilindros separados. También se pueden clasificar por su simple o doble acción basado en el número de pistones y su arreglo mecánico (rómico, de yugo, biela-manivela, plato tambaleante) y de pistón libre (FPSE), incluso por el fluido de trabajo (Ahmed *et al.*, 2020).

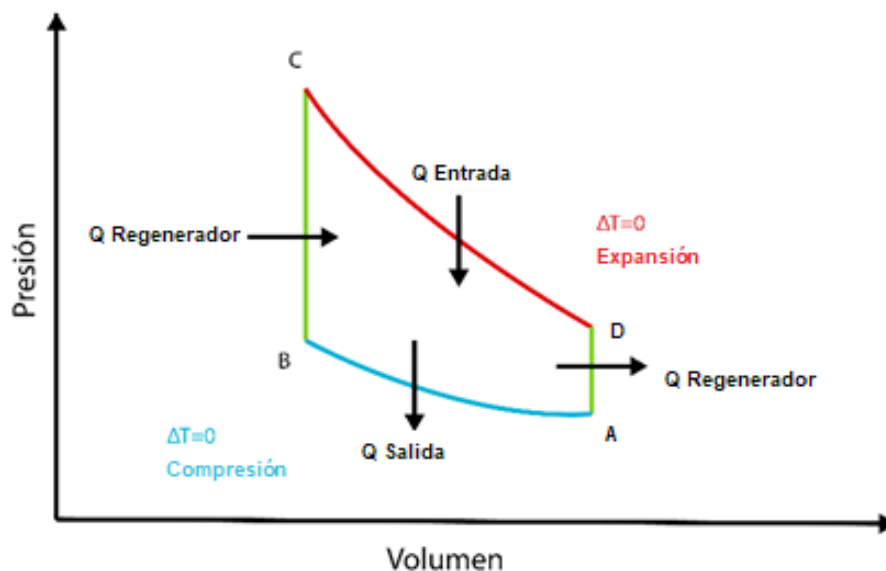


Figura 1. Diagrama P-V de ciclo Stirling.

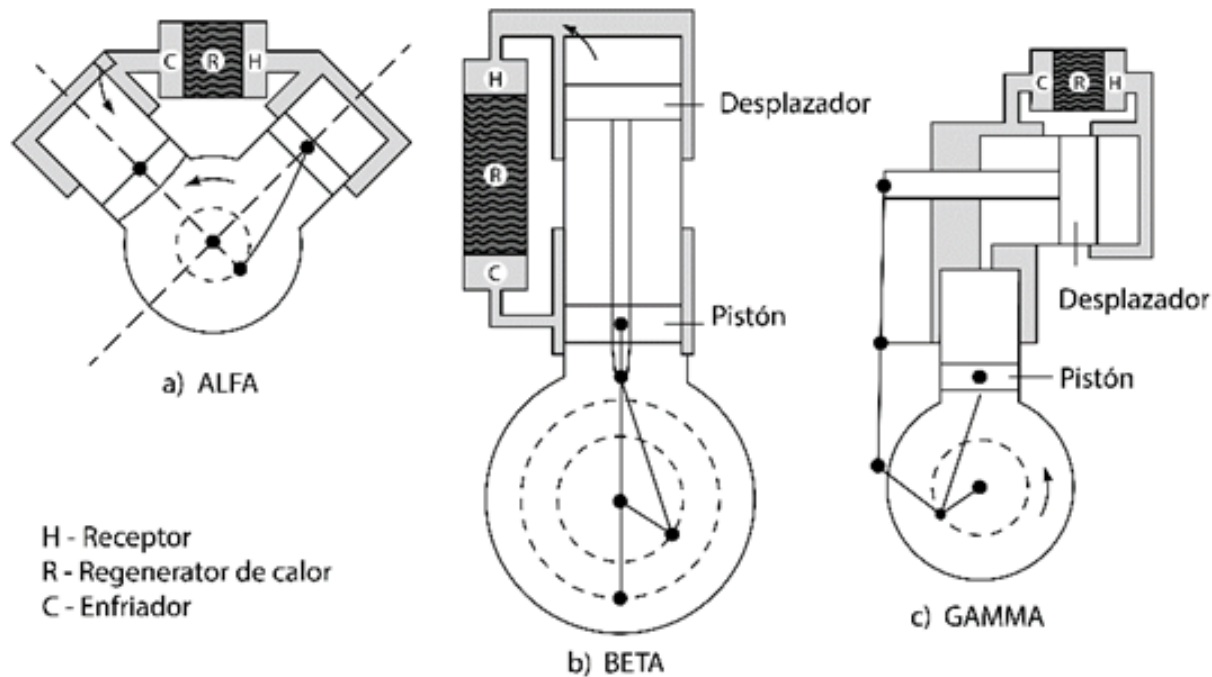


Figura 2. Clasificación de motores Stirling (Elaboración propia).

Diseño, análisis y construcción de un motor Stirling

La gran variedad de configuraciones lo hace complejo como objeto de estudio; por ejemplo, la operación es derivada de parámetros geométricos (el volumen de barrido, volúmenes muertos, área de intercambio de calor, la relación de compresión) para algunas condiciones de trabajo (velocidad, presión principal, diferencial de temperatura y fluido de trabajo).

El regenerador tiene un gran impacto en la operación y su material, porosidad y diseño debe de ser optimizado, de igual manera, la selección del diseño del calentador y del enfriador depende de la aplicación del motor Stirling. El intercambiador de calor tubular usualmente es para micro-CHP y el de forma acanalada es atractivo para aplicaciones de baja temperatura. Cada configuración tiene un calor óptimo de rotación que debe de ser respetado debido a su doble efecto. Por un lado favorece el intercambio de calor por convección y por otro lado, se obtienen pérdidas por la fricción que

causa la viscosidad del fluido. Incrementar la temperatura de entrada incrementa la energía, además, que se aumenta la potencia al freno en el eje. Sin embargo, la temperatura debe de ser moderada debido a la resistencia del material de los intercambiadores de calor, por lo que la lubricación debe de ser mínima o totalmente trabajar en seco. De igual manera, la fuga del gas de trabajo cuando este opera bajo altas presiones puede presentarse en estas condiciones (Hachem *et al.*, 2018).

En la literatura existen distintos autores que explican parcialmente el diseño, análisis y construcción de motores Stirling de los tres tipos principales. Se listan algunos resultados encontrados en la literatura a continuación.

Cinar y colaboradores (2005), diseñaron y fabricaron un motor Stirling tipo gamma con un diferencial de baja temperatura. Se realizaron pruebas utilizando gas LP como fuente de calor y agua como fluido enfriador. En un estudio de Shendage y colaboradores (2011) se presenta una metodología de diseño para un

motor Stirling tipo beta con un mecanismo de accionamiento romboidal. Se discuten aspectos como la selección de configuración, análisis del mecanismo, cálculo del volumen superpuesto y optimización del ángulo de fase. Otro estudio interesante es el de Çinar y colaboradores, (2012), quienes describen el desarrollo y rediseño de un motor Stirling tipo alfa con dos cilindros. Uno más analiza diseña y construye un motor Stirling tipo alfa de bajo costo con materiales como acrílico, realizado con el propósito de instruir sobre principios de termodinámica y conversión de energía (Hosotani *et al.*, 2014). Por otro lado Chen y colaboradores (2017), realizan un estudio exhaustivo sobre los efectos de los parámetros geométricos en un motor Stirling tipo gamma con simulaciones computacionales.

Aunado a lo anterior Rodríguez-Sosa, (2019), diseñó y manufacturó un motor Stirling tipo alfa de 32.21 cm^3 de volumen neto, y aire como fluido de trabajo, con un mecanismo biela-manivela. El prototipo fue expuesto a temperaturas hasta de 250°C en el receptor de calor, operó a 1,280 RPM con bajo ruido, sin sufrir desgaste y sin deformación, debido a la alta termofluencia de sus materiales. Concluye que, para optimizar el motor, se deben seleccionar los materiales adecuados para cada componente, se debe mantener precisión en las dimensiones de la manufactura, el aceite debe de ser muy ligero y soportar altas temperaturas.

Ahmed y colaboradores (2020) hicieron una revisión integral de modelos térmicos de los motores Stirling; corroboraron los resultados por medio de un prototipo de experimentación llamado GPU-3. Con el fin de mejorar los motores, se analizaron varios modelos y estudios de optimización, y de igual manera, se investigaron técnicas basadas en la optimización efectiva y eficiente de parámetros operativos y geométricos del motor Stirling. De La Bat y colaboradores (2020) presentaron la simulación numérica, la manufactura y la validación experimental de un motor Stirling con un mecanismo libre para

generación de energía eléctrica. Se explicó el modelo numérico llamado SENSE (simulación numérica del motor Stirling), además de las características del motor de 100 W. Explicaron el modelo empleado, el cual considera la mecánica y la termodinámica del motor concluyendo que el modelo es capaz de emular la operación de un motor Stirling de pistón libre (FPSE), debido a las variaciones que existen entre los resultados experimentales y los simulados en el modelo.

En la investigación por parte de Cheng y colaboradores (2021) se desarrollaron un modelo numérico combinando aspectos termodinámicos y dinámicos para analizar la operación de un motor Stirling de pequeña escala de doble acción de cuatro cilindros modelo alfa. El modelo lo validaron usando datos experimentales obtenidos de pruebas de un prototipo. El motor alcanza una potencia en el eje de 26W con 754 RPM, bajo un torque de 0.33 Nm, mientras que de la simulación se obtiene una potencia en el eje de 24.5W y una velocidad de 780 RPM. Los resultados indican que se puede usar para estudiar la operación de motores de baja escala expuestos a diferentes condiciones de operación. Luo y colaboradores (2024) realizaron un estudio de un modelo dinámico lineal combinado para predecir la operación de salida y optimizar los parámetros de un FPSE (Motor Stirling de Pistón Libre) de tipo gamma de 60W.

En los artículos revisados sobre motores Stirling, se observó un enfoque detallado en aspectos como el diseño, análisis y construcción de estos dispositivos, sin embargo, hay ciertos aspectos que no se mencionan explícitamente y que podrían ser igualmente importantes, tales como la selección de materiales, la gestión de tolerancias durante la fabricación de los componentes y la optimización del diseño del regenerador para mejorar la eficiencia del motor. Finalmente, aspectos cruciales como la durabilidad de los materiales y el análisis de vida útil no son discutidos en profundidad.

Eficiencia y fiabilidad

A diferencia de los motores de combustión interna, el motor Stirling es altamente eficiente y puede funcionar con una variedad de fuentes de calor, lo que lo hace más confiable y versátil en diversas aplicaciones. La alta eficiencia del motor Stirling permite una conversión más efectiva de calor en trabajo mecánico, lo que resulta en un mayor rendimiento global del sistema. Normalmente, la eficiencia de los motores Stirling es expresada por el área de eficiencia térmica, la cual es calculada con base en el principio de Carnot, usando las temperaturas extremas del ciclo. En el mismo, se consideran las pérdidas térmicas y las pérdidas de fricción del motor ya que impactan en la eficiencia final y en la operación (Hachem *et al.*, 2018).

La eficiencia de los motores Stirling es atribuida a su tipo de ciclo cerrado de operación, donde el fluido de trabajo va desde la compresión hasta el proceso de expansión. Comparados con otros motores de calor, los Stirling pueden alcanzar una eficiencia térmica muy alta dependiendo de su operación en bajos diferenciales de temperatura, reduciendo pérdidas térmicas. Cabe mencionar que la eficiencia puede ser optimizada a través de los parámetros de diseño y los ajustes en la operación (Luo *et al.*, 2024). Por ejemplo, algunos estudios han demostrado que los motores Stirling pueden alcanzar un rango de eficiencia de 38 a 40% dependiendo de la configuración (Ahmed *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2021).

Aplicaciones de los Sistemas con Motor Stirling

Sistema Dish Stirling (SDS)

Los sistemas de disco parabólico o Dish Stirling, deben su nombre a que están diseñados con espejos parabólicos de revolución y un motor de combustión externa Stirling, los cuales se ubican en la zona focal de concentrador para transformar la radiación solar en electricidad.

Diversos autores han realizado estudios para evaluar criterios de diseño y eficiencia. En el año 2020, Zayed y colaboradores (2020), realizaron un estudio para predecir algunos parámetros de operación y un análisis económico de un sistema de generación de electricidad con tecnología SDS, con un rango de potencia de 25 kW. En el estudio se desarrolló un modelo matemático implementado en MATLAB para simular las condiciones de operación en la ciudad de Tianjin, China. Aunado a lo anterior realizaron un estudio para evaluar la viabilidad, en relación con el costo de la electricidad y el ciclo de vida del SDS, por lo que da entrada a poder comparar y evaluar con otras aplicaciones. Los autores concluyen que el SDS, aun no es apropiado debido a los costos de producción y recomienda ubicarlos en sistemas con alta radiación solar.

En ese mismo año, Zayed y colaboradores (2020), desarrollaron un estudio para un diseño óptimo de parámetros en la operación de un SDS balanceado termodinámicamente usando un modelo con múltiples objetivos con un enjambre de partículas (MOPSO), considerando opto-geometría y un balance de energía de los diferentes componentes del sistema. Los resultados mostraron un aprovechamiento máximo de 23.46 kW de potencia de salida con una eficiencia de 30.15% demostrando que un concentrador de radio de 2.5-15 m puede producir una potencia de salida de 1.43-53.34 kW con eficiencias de 29.80-30.20 %.

Por su parte, Buscemi y colaboradores (2020), mediante un análisis teórico, desarrollaron un modelo numérico del sistema basado en un balance de energía del colector y una expresión simplificada de la eficiencia de carga parcial del motor Stirling. El modelo muestra un excelente ajuste a los datos experimentales y puede predecir la salida de potencia eléctrica. El análisis realizado en el estudio muestra una fuerte correlación lineal entre potencia eléctrica neta y radiación cuando los espejos están limpios ya que se estima una reducción del 30% en eficiencia óptica debido a la suciedad de los espejos.

El año siguiente, Zayed y colaboradores (2021), realizaron un análisis paramétrico integral, diseño y evaluación de la operación de un SDS. El estudio modela matemáticamente en MATLAB un SDS y hace, tanto un análisis de la óptica, como de la termodinámica, analizando parámetros como el diámetro del concentrador, la temperatura del receptor, la dirección de la radiación solar, la velocidad del aire y la temperatura ambiente, para determinar el efecto de la salida de potencia y de la eficiencia de SDSS. Concluyen que las investigaciones deberían de enfocarse en la óptica y los componentes de la parte térmica, paralelamente con la industrialización de los procesos del concentrador y receptor, el cual se considera un reto esencial para un mejor desarrollo de los sistemas SDSS.

También Buscemi y colaboradores (2021) desarrollaron una metodología de optimización para un SDS basado en la distribución de la frecuencia local de la dirección de la radiación normal, enfocándose en una estrategia que ayuda a ampliar la difusión del SDS para optimizar la medida del receptor según la hora del día ya que este influye en el haz de radiación y repercute en el suministro de energía y en los costos de la energía producida. Los resultados muestran una eficiencia de 24%.

Shaikh y colaboradores (2021) desarrollaron un estudio de SDS para evaluar un modelo que simula condiciones ambientales en la ciudad de Jamshoro, Pakistán, con el propósito de predecir la operación del sistema SDS. Como parte del análisis, los autores consideraron las emisiones de CO₂, además de los parámetros de opto-geometría, con el fin de obtener más salida de potencia en el sistema. También demostraron que, según la sensibilidad del análisis, el área del espejo y el colector afectan al costo de la producción de la corriente eléctrica, por lo que recomiendan buscar la hibridación de estos sistemas para hacerlos más rentables y eficientes.

Sistema CHP Stirling

Los sistemas de micro-cogeneración de calor y electricidad (micro-CHP) con motores Stirling presentan una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos sistemas permiten la generación simultánea de electricidad y calor, lo que puede aumentar la eficiencia total del sistema en comparación con las tecnologías convencionales de generación de energía y calefacción.

Algunos estudios relevantes encontrados en la literatura como el de Kaldehi y colaboradores (2017), tratan sobre el diseño de un motor alfa para aplicaciones residenciales, optimizando el rendimiento y la eficiencia del sistema mediante modelos matemáticos y simulaciones. Los resultados mostraron una eficiencia del sistema del 85% y una potencia al freno máxima de 4 kW con una eficiencia del 31.5%, destacando la viabilidad del motor Stirling en diferentes climas.

Otro aspecto importante de estudio es la sostenibilidad ambiental y económica de sistemas de micro-CHP con motores Stirling mediante análisis del ciclo de vida (LCA) y costo del ciclo de vida (LCC). Stamford y colaboradores (2018) reportaron que bajo condiciones de alta eficiencia, estos sistemas son preferibles a las tecnologías convencionales, sin embargo, con eficiencias más realistas, no son competitivos en términos ambientales ni económicos, presentando mayores costos y peores impactos ambientales en algunos casos.

De las investigaciones realizadas por Qiu y colaboradores (2019), se diseñó un sistema micro-CHP basado en un motor Stirling capaz de proporcionar 1 kW de energía eléctrica con un 38% de eficiencia combustible-electricidad y 1.1 kW de energía térmica a 80°C. Este sistema utiliza un quemador de gas recuperado, un Stirling de Pistón Libre (FPSE por sus siglas en inglés), y un alternador lineal, empleando helio como

gas de trabajo. El diseño incluye mejoras en los componentes para reducir las pérdidas térmicas y aumentar la eficiencia del motor. En el estudio de Schneider y colaboradores (2020), se revisan los desarrollos comerciales y la investigación en sistemas CHP alimentados con biomasa y motores Stirling. Allí se identifican ventajas como la alta eficiencia térmica y bajas emisiones, pero también desafíos como la obstrucción por cenizas (que es una problemática común con sistemas de biomasa) y la necesidad de altas temperaturas para el suministro de calor. En Ferreira y colaboradores (2020), se evaluó el motor Stirling comparando fuentes de energía externa como la solar y la biomasa. Usando MATLAB para el modelado térmico de un motor Stirling tipo alfa, los resultados mostraron que la biomasa provee 87.5% más energía de entrada que el sistema solar, con una eficiencia de 46.67%, demostrando una alta eficiencia térmica y evitando problemas de intermitencia de la energía solar.

Así mismo, González-Pino y colaboradores (2020), presentaron la validación de un modelo que usa gas natural en un calentador de un sistema CHP Stirling, mostrando que el modelo puede producir electricidad y agua caliente bajo condiciones normales con una diferencia promedio del 2% respecto a la experimentación real. Zhu y colaboradores (2021), revisaron los aspectos tecnológicos de los sistemas de generación de energía térmica y eléctrica con motores Stirling (CHP Stirling), evaluando el desarrollo comercial y la parte económica, así como los logros hasta la fecha y los trabajos futuros.

Investigaciones realizadas por Auñón-Hidalgo y colaboradores (2021), estudiaron una instalación que combina un módulo fotovoltaico y un colector solar térmico con un sistema micro CHP Stirling. Con el uso de baterías de Li-ion y un tanque de agua caliente, el sistema puede suministrar el 75.6% de la demanda energética de una casa, reduciendo las emisiones de CO₂ en un 36.3 %. Con un aumento de la capacidad de la batería, el sistema podría ser completamente autónomo.

En el estudio que realizaron de Voronca y colaboradores (2022), se caracterizó un sistema micro CHP Stirling que utiliza biomasa, mostrando que el flujo de transferencia de calor influye en la temperatura del agua suministrada. Se sugiere el uso de un tanque de almacenamiento de energía térmica para mantener la temperatura y mejorar la eficiencia del sistema.

Los sistemas de micro-CHP con motores Stirling ofrecen una alternativa viable para la generación combinada de calor y electricidad, con beneficios como alta eficiencia térmica y bajas emisiones. No obstante, existen desafíos técnicos y económicos que deben abordarse para mejorar la viabilidad de estos sistemas, como la mejora de la eficiencia y confiabilidad de los motores Stirling, la reducción de costos de componentes y la optimización de la integración con redes eléctricas y sistemas de calefacción existentes.

Calefacción y refrigeración

Se han realizado investigaciones que emplean al motor Stirling en sistemas de refrigeración y la generación de energía centradas en la optimización de bombas de calor Stirling, el análisis de refrigeradores Stirling tipo Beta y V, el modelado termodinámico de sistemas Stirling y la identificación de pérdidas en criocoolers Stirling. La influencia de parámetros geométricos, irreversibilidades internas y externas, fluidos de trabajo y pérdidas mecánicas en el rendimiento de los motores Stirling, la selección de fluidos de trabajo y el análisis de pérdidas mecánicas, son investigaciones que han contribuido al avance del conocimiento en el campo de los motores Stirling (Getie *et al.*, 2020).

Sistemas Híbridos con Motor Stirling

Existen pocas referencias en la literatura de sistemas de motor Stirling Híbridos que se pueden dividir en dos tipos de hibridación que usan motor Stirling, dependiendo de la fuente de calor o hibridación en la producción eléctrica.

Tipos de sistemas híbridos

Sistemas híbridos por la fuente de calor

Los sistemas híbridos por la fuente de calor no son comunes en la literatura o en aplicaciones industriales. Un sistema Stirling funciona con un rango de calor muy definido y por lo tanto la fuente de calor también se reduce a un tipo, pero en la literatura se localizó una propuesta de sistema con dos fuentes de calor distintas, se centra en evaluar el sistema de motor Stirling con calor mediante biomasa (pellets) y concentración solar (Ferreira *et al.*, 2020).

Sistemas generación eléctrica híbridos con motor Stirling

Normalmente los sistemas de generación eléctrica híbridos son de tipo solar fotovoltaica o eólico con otra fuente de generación, sin embargo, hasta hace poco no se había estudiado la integración

de un sistema Dish Stirling con otra tecnología de producción eléctrica. En este sentido, la investigación de Shboul y colaboradores (2021), destaca con un estudio sobre un sistema que muestra un sistema híbrido eólico–dish Stirling con resultados muy interesantes.

Selección de sistemas energéticos

Actualmente el grupo de investigación del Instituto Tecnológico de Sonora, trabaja en la optimización de un sistema de micro generación Stirling que opere de forma dual (con suministro solar-gas), con el fin de evitar la intermitencia. La idea es aprovechar durante el día la energía solar, y por la noche aprovechar los recursos de energía en forma de gas con los que cuenta el usuario como gas natural, gas LP o biogás y aprovechar las características de los motores Stirling de trabajar con calor externo, su buena eficiencia y que el sistema opera de manera continua (ver Figura 3).

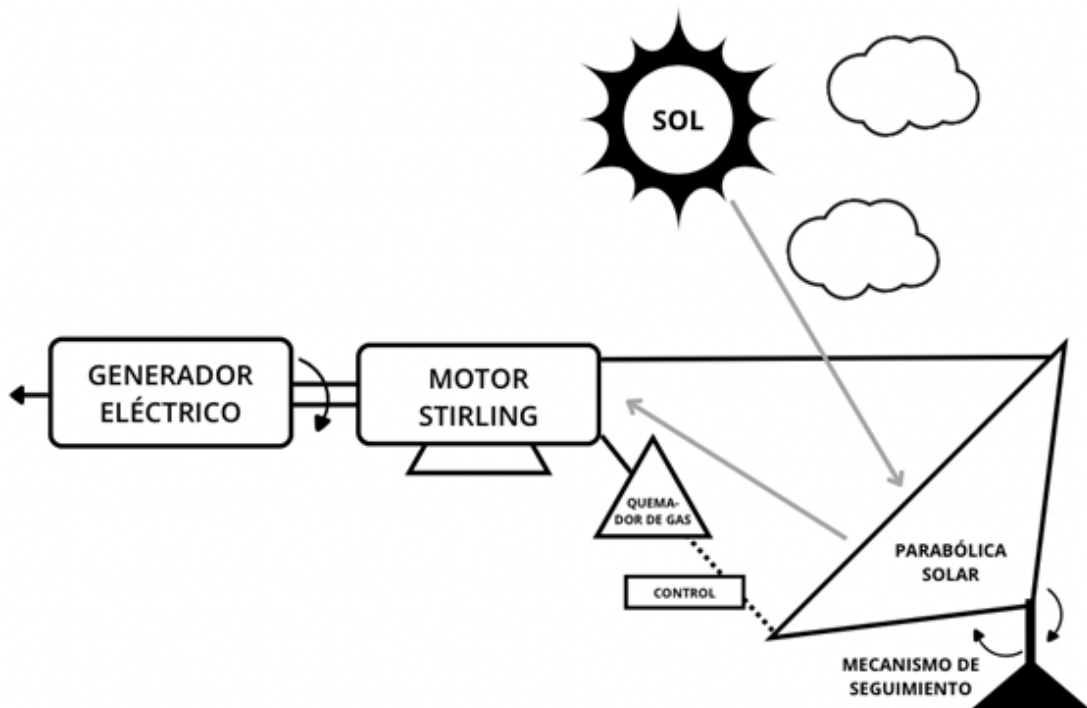


Figura 3. Sistema de generación eléctrica de entrada dual (híbrida) gas-solar (Elaboración propia).

Desafíos y Oportunidades

El motor Stirling posee un alto potencial para emplear en conjunto energía renovable y sustentable, aplicar tecnologías como la solar, criogénica y micro CHP Stirling. Sin embargo, aún quedan algunos desafíos por superar. Con el fin de aumentar la viabilidad de los motores Stirling, las investigaciones se deben dirigir a las problemáticas asociadas a fugas en los fluidos de trabajo, desarrollar un arranque robusto y un mecanismo sensible, de igual manera, minimizar el calor requerido, la pérdida de potencia y lograr más eficiencia en la operación (Ahmed *et al.*, 2020).

Mantenimiento de los motores Stirling.

La simplicidad mecánica del motor Stirling reduce la necesidad de mantenimiento y prolonga su vida útil en comparación con otros sistemas de generación de energía.

Mantenimiento de los SDS

Se recomienda realizar una inspección y limpieza del concentrador periódicamente, así como los componentes de recepción de energía para una operación óptima y eficiente, inspeccionar los niveles y que no existan fugas en el gas de trabajo. De igual forma, se recomienda monitorear que el generador esté cargando adecuadamente, la distribución de flujo de calor, la superficie del receptor y el funcionamiento del SDS (Zayed *et al.*, 2020).

Mantenimiento de los sistemas CHP Stirling

Realizar inspecciones de periódica para detección de desgaste, fugas o algunos problemas que puedan afectar el sistema, retirar contaminantes en los componentes regularmente de la acumulación de hollín, lubricar las partes móviles. La transferencia de calor se debe inspeccionar, que no se presenten fugas de gas de trabajo y que el generador esté cargando correctamente.

Lo anterior es requerido para mantener la eficiencia y la buena operación del equipo (Zhu *et al.*, 2021).

Costos.

Costos de los SDS

Los costos directos calculados en Zayed y colaboradores (2021) de los sistemas dish Stirling (SDS), incluyendo el plato concentrador, es de 350 USD/m², el motor Stirling y generador 400 USD/kW, la cavidad receptora es de 220 USD/kW. El costo aproximado de producción de energía con un sistema dish Stirling está entre 0.115 y 0.256 USD/kWh. En cuanto a costos indirectos, como la construcción, se considera del 16% de los costos directos, así como la reparación y mantenimiento alcanza los 40 USD/kW-Año con un tiempo de vida de 30 años.

Costo de los sistemas CHP

En Ferreira y colaboradores (2017), se desarrolló una metodología para optimizar los sistemas micro CHP Stirling desde el punto de vista térmico y económico. De los resultados se obtiene que la solución óptima (técnico-económica) usando su metodología es una planta de 3.61 kWp eléctricos y 9.65 kWp térmicos, con un costo total de inversión de 18,059 Euros. En otro estudio de Ferreira y colaboradores (2020) se estudian dos sistemas CHP Stirling uno alimentado por biomasa y otro por energía solar concentrada. El costo de inversión del sistema solar es de 0.166 euros/kWh, mientras que el de biomasa es de 0.109 euros/kWh. La ventaja del sistema basado en biomasa es que puede proveer una potencia de salida con una alta eficiencia térmica y que evita los problemas que normalmente están relacionados con la intermitencia de la energía solar.

Conclusiones

El capítulo ofrece una visión detallada de la evolución, diseño y aplicaciones de los motores

Stirling, destacando su relevancia en el contexto de sostenibilidad y eficiencia energética. Las investigaciones se han centrado en la optimización del rendimiento termodinámico, explorando variables como el volumen muerto y la efectividad del regenerador, la integración de materiales avanzados y tecnologías para mejorar la eficiencia y durabilidad del motor. En términos de aplicaciones, los motores Stirling son utilizados en sistemas de generación de energía, refrigeración y cogeneración de calor y electricidad (micro-CHP). Estos sistemas no solo mejoran la eficiencia energética, sino que también contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Estudios recientes han demostrado su potencial para alcanzar altos niveles de eficiencia térmica y fiabilidad operativa, sin embargo, a pesar de los avances, el capítulo identifica brechas en el conocimiento, como la necesidad de una mejor optimización de los parámetros de diseño y la selección adecuada de materiales.

También se resalta la importancia de reducir los costos de inversión para aumentar la viabilidad comercial de los sistemas basados en motores Stirling. En conclusión, los sistemas híbridos que utilizan el motor Stirling representan una tecnología con un enorme potencial para contribuir a un futuro energético más sostenible y eficiente. Las investigaciones y desarrollos continuos en este campo son esenciales para superar los desafíos técnicos y económicos, y así lograr una implementación más amplia y efectiva de esta tecnología en diversas aplicaciones industriales y residenciales.

Agradecimientos

A la red RIETI-CYTED justamente por permitirnos compartir experiencias en el campo de las energías renovables y enriquecernos con los conocimientos aportados por los estudios desarrollados en las instituciones integrantes. Al Dr. Santiago Veiga por su apoyo al efectuar el arbitraje, reconociendo su esfuerzo y sus observaciones a este documento.

Referencias

- Ahmed, F., Huang, H., Ahmed, S., & Wang, X. (2020). A comprehensive review on modeling and performance optimization of Stirling engine. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6098–6127. <https://doi.org/10.1002/er.5214>
- Arslan, T. A. (2023). A Comprehensive Review on Stirling Engines. *Engineering Perspective*, 3(3), 42–56. <https://doi.org/10.29228/eng.pers.66847>
- Auñón-Hidalgo, J. A., Sidrach-de-Cardona, M., & Auñón-Rodríguez, F. (2021). Performance and CO2 emissions assessment of a novel combined solar photovoltaic and thermal, with a Stirling engine micro-CHP system for domestic environments. *Energy Conversion and Management*, 230, 113793. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113793>
- Buscemi, A., Guarino, S., Ciulla, G., & Lo Brano, V. (2021). A methodology for optimisation of solar dish-Stirling systems size, based on the local frequency distribution of direct normal irradiance. *Applied Energy*, 303, 117681. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117681>
- Buscemi, A., Lo Brano, V., Chiaruzzi, C., Ciulla, G., & Kalogeri, C. (2020). A validated energy model of a solar dish-Stirling system considering the cleanliness of mirrors. *Applied Energy*, 260, 114378. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114378>
- Cheng, C.-H., Tan, Y.-H., & Liu, T.-S. (2021). Experimental and Dynamic Analysis of a Small-Scale Double-Acting Four-Cylinder α -Type Stirling Engine. *Sustainability*, 13(15), 8442. <https://doi.org/10.3390/su13158442>

- Çinar, C., Aksoy, F., & Erol, D. (2012). The effect of displacer material on the performance of a low temperature differential Stirling engine: The investigation of an LTD Stirling engine. *International Journal of Energy Research*, 36(8), 911–917. <https://doi.org/10.1002/er.1861>
- Cinar, C., Yucesu, S., Topgul, T., & Okur, M. (2005). Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure. *Applied Energy*, 81(4), 351–357. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.08.004>
- De La Bat, B. J. G., Dobson, R. T., Harms, T. M., & Bell, A. J. (2020). Simulation, manufacture and experimental validation of a novel single-acting free-piston Stirling engine electric generator. *Applied Energy*, 263, 114585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114585>
- Ferreira, A. C., Nunes, M. L., Teixeira, J. C. F., Martins, L. A. S. B., Teixeira, S. F. C. F., & Nebra, S. A. (2017). Design of a solar dish Stirling cogeneration system: Application of a multi-objective optimization approach. *Applied Thermal Engineering*, 123, 646–657. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.127>
- Ferreira, A. C., Silva, J., Teixeira, S., Teixeira, J. C., & Nebra, S. A. (2020). Assessment of the Stirling engine performance comparing two renewable energy sources: Solar energy and biomass. *Renewable Energy*, 154, 581–597. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.020>
- Getie, M. Z., Lanzetta, F., Bégot, S., Admassu, B. T., & Hassen, A. A. (2020). Reversed regenerative Stirling cycle machine for refrigeration application: A review. *International Journal of Refrigeration*, 118, 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.06.007>
- González-Pino, I., Pérez-Iribarren, E., Campos-Celador, A., Terés-Zubiaga, J., & Las-Heras-Casas, J. (2020). Modelling and experimental characterization of a Stirling engine-based domestic micro-CHP device. *Energy Conversion and Management*, 225, 113429. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113429>
- Hachem, H., Gheith, R., Aloui, F., & Ben Nasrallah, S. (2018). Technological challenges and optimization efforts of the Stirling machine: A review. *Energy Conversion and Management*, 171, 1365–1387. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.042>
- Hosotani, K., & Nakatani, K. (2014). Development of an Acrylic Stirling Engine for Engineering Education and Simple Method for Visualizing Temperature Distributions.
- Kaldehi, B. J., Keshavarz, A., Safaei Pirooz, A. A., Batooei, A., & Ebrahimi, M. (2017). Designing a micro Stirling engine for cleaner production of combined cooling heating and power in residential sector of different climates. *Journal of Cleaner Production*, 154, 502–516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.006>
- Luo, X., Wang, X., Yan, C., Zhang, A., Zhang, X., & Ye, W. (2024). Performance prediction and parametric optimization of γ -type free piston Stirling engine. *Thermal Science*, 28(1 Part A), 269–281. <https://doi.org/10.2298/TSCI230709232L>
- Qiu, S., Gao, Y., Rinker, G., & Yanaga, K. (2019). Development of an advanced free-piston Stirling engine for micro combined heating and power application. *Applied Energy*, 235, 987–1000. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.036>

- Rodríguez Sosa, G. (2019). Diseño, Construcción e Instrumentación de un Motor Stirling tipo Alfa.ITESCA.
- Schneider, T., Müller, D., & Karl, J. (2020). A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110288>
- Shaikh, P. H., Lashari, A. A., Leghari, Z. H., & Memon, Z. A. (2021). Techno-enviro-economic assessment of a stand-alone parabolic solar dish Stirling system for electricity generation. *International Journal of Energy Research*, 45(7), 10250–10270. <https://doi.org/10.1002/er.6513>
- Shboul, B., AL-Arifi, I., Michailos, S., Ingham, D., AL-Zoubi, O. H., Ma, L., Hughes, K., & Pourkashanian, M. (2021). Design and Techno-economic assessment of a new hybrid system of a solar dish Stirling engine integrated with a horizontal axis wind turbine for microgrid power generation. *Energy Conversion and Management*, 245, 114587. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114587>
- Shendage, D. J., Kedare, S. B., & Bapat, S. L. (2011). An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism. *Renewable Energy*, 36(1), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.041>
- Singh, U. R., & Kumar, A. (2018). Review on solar Stirling engine: Development and performance. *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.08.016>
- Stamford, L., Greening, B., & Azapagic, A. (2018). Life cycle environmental and economic sustainability of Stirling engine micro-CHP systems. *Energy Technology*, 6(6), 1119–1138. <https://doi.org/10.1002/ente.201700854>
- Voronca, Ștefan-D., Siroux, M., & Darie, G. (2022). Experimental Characterization of Transitory Functioning Regimes of a Biomass Stirling Micro-CHP. *Energies*, 15(15), 5547. <https://doi.org/10.3390/en15155547>
- Zare, S., Tavakolpour-saleh, A. R., Aghahosseini, A., Sangdani, M. H., & Mirshekari, R. (2021). Design and optimization of Stirling engines using soft computing methods: A review. *Applied Energy*, 283, 116258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116258>
- Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Li, W., & Elaziz, M. A. (2020). Optimal design parameters and performance optimization of thermodynamically balanced dish/Stirling concentrated solar power system using multi-objective particle swarm optimization. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115539. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115539>
- Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Li, W., Sadek, S., & Aboelmaaref, M. M. (2021). A comprehensive review on Dish/Stirling concentrated solar power systems: Design, optical and geometrical analyses, thermal performance assessment, and applications. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124664>

Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Zhao, Z., Zhong, S., & Kabeel, A. E. (2021). Comprehensive parametric analysis, design and performance assessment of a solar dish/Stirling system. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.007>

Zayed, M. E., Zhao, J., Li, W., Elsheikh, A. H., Zhao, Z., Khalil, A., & Li, H. (2020). Performance prediction and techno-economic analysis of solar dish/stirling system for electricity generation. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114427. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114427>

Zhu, S., Yu, G., Liang, K., Dai, W., & Luo, E. (2021). A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology. *Applied Energy*, 294, 116965. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116965>

Manuscrito recibido: 12 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 8 de octubre de 2024

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 2024

Políticas editoriales

GEOS es el boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, contiene artículos de investigación originales así como artículos de divulgación y notas cortas sobre aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM; se publican tres números en el año en forma impresa como electrónica.

Los artículos de investigación publicados en **GEOS** deben ser **originales** y son **arbitrados** por al menos dos expertos del tema; mientras que los trabajos de divulgación son arbitrados por un especialista del tema. Los editores se reservan el derecho de decidir sobre la publicación de notas o reportes.

Son particularmente bienvenidas todas aquellas contribuciones que coadyuven a la difusión y a la enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

Una vez concluido el proceso de arbitraje, el manuscrito será devuelto al primer autor con los comentarios de los árbitros y del editor. El manuscrito corregido en forma final será editado por el Editor Técnico de **GEOS** para su publicación impresa y electrónica. El autor principal tendrá oportunidad de revisar la versión final de su trabajo antes de publicarlo en WEB de la UGM (www.ugm.org.mx).

Cualquier cambio a la política editorial de GEOS se publicará en el primer número de cada volumen.

Instrucciones para los autores

Publicar en GEOS es gratuito, todos los manuscritos deberán enviarse en forma electrónica al editor principal:

Luis Alberto Delgado Argote (CICESE)
ldelgado@cicese.mx

Preparación de texto:

Podemos procesar manuscritos en formato WORD, texto ASCII o LaTeX. Se recomienda que los manuscritos no excedan 12 páginas en el formato de la revista (una página contiene aproximadamente 900 palabras).

La publicación de figuras a color en la versión impresa de GEOS no es posible por ahora, sin embargo la versión electrónica puede contener ilustraciones a todo color, se recomienda a los autores preparar sus figuras pensando en ambas ediciones.

Secciones:

Preparación de figuras e ilustraciones:

Las ilustraciones y figuras se pueden enviar en cualquiera de los siguientes formatos: **TIF, EPS, PS, DXF, DWG, PDF, JPG o WMF**; y deben enviarse en archivos individuales y separados del texto.

Con excepción de las notas, todas las contribuciones deberán incluir: título, resumen (en español y en inglés), introducción, una sección de métodos, una sección de resultados, una sección de discusión y/o conclusiones y una sección de referencias bibliográficas.

Resumen:

El no deberá exceder 350 palabras. Al prepararlo haga énfasis en los objetivos de la investigación, los resultados más importantes y las conclusiones alcanzadas. En el resumen no deben aparecer citas bibliográficas.

Introducción:

La introducción deberá destacar la relevancia del problema e incluir una revisión adecuada de publicaciones antecedentes sobre el tema. El objetivo de la introducción es enmarcar el problema dentro del estado general del conocimiento en el área que le corresponde, destacar la contribución del trabajo y motivar la lectura del artículo completo.

Metodología:

La metodología empleada en el trabajo deberá ser descrita con suficientes detalle para que otros miembros de la comunidad puedan comprenderla, pero al mismo tiempo, debe ser sencilla para que un lector inexperto pueda comprender las ideas fundamentales. Los desarrollos demasiado detallados, pero necesarios, deben diferirse a una sección apéndice.

Resultados:

Usualmente, los resultados de la aplicación de cualquier metodología pueden presentarse en forma de tablas o figuras. Evite redundancias mediante una adecuada selección de sus resultados. Los pies de figura deberán ser lo suficientemente explicativos para resaltar la importancia de lo que se ilustra sin necesidad de acudir al texto.

Discusiones y conclusiones:

En esta sección se deben discutir las implicaciones de los resultados, su concordancia o divergencia con hipótesis anteriores, construir nuevas hipótesis

derivadas de ellos, discutir sus aplicaciones prácticas y posibles limitaciones.

Referencias

Se debe incluir la lista de referencia de las fuentes utilizadas en el artículo.

Las referencias deberán estar agrupadas en orden alfabético por apellido del primer autor. Sugerimos utilizar el estilo de citación recomendado por Harvard University. Presentamos algunos ejemplos para facilitar la citación.

Si la citas textuales tienen 40 palabras o menos, utilice comillas al principio y al final de la misma y mencione el apellido del autor, el año y la página de donde proviene la cita. Si tiene más palabras, utilice párrafo con diferente sangría. Si un autor es citado más de una vez el mismo año, utilice el sufijo: a, b, etc. para distinguir el trabajo.

Aquellos manuscritos que no estén en publicados (aceptados o en prensa) no deberán incluirse en la referencias. Los artículos de divulgación podrán agregar una sección de referencias recomendadas.

Formato para citas:

Para cada autor o co-autor, escriba con mayúscula únicamente la primera letra del apellido y después las iniciales, agregue el año entre paréntesis. Utilice letras mayúsculas sólo en la primera letra del título y para nombres propios.

Cuando haga la referencia de un artículo de publicación periódica, incluya el nombre completo de la revista, volumen y páginas. Por ejemplo:

Alvarez-Borrego, S. (1996). Satellite derived photosynthetic pigment surveys: A review of marine phytoplankton biomass and productivity, *Geofísica Internacional*, v. 35(1), 51-61.

Ripa, P., y Velázquez, G., (1993), Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, v. 32(1), 41-56.

Sánchez-Sesma, F. J., and Luzón, F., (1995), Seismic response of three-dimensional alluvial valeys for incident P, S, and Rayleigh waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 85(1), 269-284.

Cuando haga referencia de un libro completo, incluya los siguientes datos.

Winkler, H.G.F. (1967). *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 2nd ed. New York, 237 p.

Cuando haga la referencia de una parte de un documento o capítulo de libro, incluya los siguientes datos.

Lomnitz, C., (1995), Diez años después: una reinterpretación de la catástrofe de 1985. En: F. Medina-Martínez, L. A. Delgado-Argote y G. Suárez-Reynoso, editores, *la Sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1)*, (p. 61-67). Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 2.

Cuando haga la referencia de una tesis, debe hacer mención al grado. Ejemplo:

Gutiérrez Carmona, D.M. (2014). *Estudio magnetotélúrico de la Falla Agua Blanca, Baja California, México*. Tesis de maestría. Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada, Baja California. México.

Cuando haga la referencia de recursos electrónicos, incluya los datos completos y la dirección electrónica. Ejemplo:

Ripa, P. y Velázquez, G. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, 32 (1), 41-56. Recuperado de: [http://](http://www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf)

www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf

Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (México). <https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=inegi>

Presentaciones gráficas (gráficas, diagramas, mapas, dibujos, figuras, ilustraciones en general, fotografías, etc.)

Cuando las presentaciones gráficas son tomadas de otro autor o página web, debe mencionarse la fuente de donde fue tomada.

Ejemplos:

Tomado de Google Hearth (2014).

Modificado de Pérez (2014) p. 234.

Unidades

Con algunas excepciones, todas las unidades físicas deberán expresarse en el Sistema Internacional de unidades (SI). Las siguientes excepciones son aceptables:

densidad en g/cm³

presión en bar

Expresiones matemáticas

Escriba sus ecuaciones en la forma más simple posible, utilizando signos de puntuación. Utilice itálicas para todos los símbolos, exceptuando las letras griegas. Vectores y matrices se escribirán con negrillas. Numere en forma consecutiva y entre paréntesis todas las ecuaciones que aparezcan en el texto.

$$\mathbf{u}_h(x, z, t) = (U_j^x(t)\phi_j(x, z), U_j^z(t)\phi_j(x, z))^T \quad (1)$$

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Avith Mendoza Ponce
Editores



geos

Información con:

María Concepción González Martínez
División de Ciencias de la Tierra
Tel: 01(646)174-5050
Ext: 26021
Correo electrónico: conganza@cicese.edu.mx



geos

